

การพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กโดยการเติมโลหะแม่อลูมิเนียม-  
เซอร์โคเนียม-ไทเทเนียม และกระบวนการอัลตราโซนิกในโลหะ

หลอมเหลว

DEVELOPMENT OF Al-Fe ALLOYS BY THE ADDITION  
OF Al-Zr-Ti MASTER ALLOY AND ULTRASONIC MELT  
PROCESSING

นางสาวพิชญภา เลิศฤทธิ  
MS. PITCHAYAPA LERTRIT

นางสาวภุรีจันทร์ วิวัฒน์  
MS. POORICHAN WIWAT

นางสาวหัตทยา วัฒนน้อย  
MS. HATTAYA WATANANOI

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF Al-Fe ALLOYS BY THE ADDITION  
OF Al-Zr-Ti MASTER ALLOY AND ULTRASONIC MELT  
PROCESSING



MS. PITCHAYAPA LERTRIT  
MS. POORICHAN WIWAT  
MS. HATTAYA WATANANOI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN  
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กโดยการเติมโลหะแม่อลูมิเนียม-  
เซอร์โคเนียม-ไทเทเนียม และกระบวนการอัลตราโซนิกในโลหะ  
หลอมเหลว

DEVELOPMENT OF Al-Fe ALLOYS BY THE ADDITION OF  
Al-Zr-Ti MASTER ALLOYS AND ULTRASONIC MELT  
PROCESSING

นักศึกษา

นางสาวพิชญาภา เลิศฤทธิ รหัสนประจำตัว 61010741  
นางสาวภุจิจันทร์ วิวัฒน์ รหัสนประจำตัว 61010842  
นางสาวหทัยา วัฒนน้อย รหัสนประจำตัว 61011168

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

(ดร.สุวารีย์ ชาญกิมั่นคง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หัวข้อปริญญานิพนธ์

การพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กโดยการเติมโลหะแม่อลูมิเนียม-เซอร์โคเนียม-ไทเทเนียม และกระบวนการอัลตราโซนิกในโลหะหลอมเหลว

## นักศึกษา

นางสาวพิชญภา เลิศฤทธิ์

นางสาวฐรีจันทร์ วิวัฒน์

นางสาวหัตยา วัฒนน้อย

## หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ปีการศึกษา

2564

## อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ดร.สุวารี ชาญกิจมั่นคง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กด้วยการเติมโลหะแม่ Al-Zr-Ti ที่มีความเข้มข้นสูงร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล สมบัติการนำไฟฟ้า และการทนการกัดกร่อน โดยอลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทคติกเหล็กเป็นเกรดใหม่ที่มีความน่าสนใจในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลเนื่องจากพบว่า โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเกรนอลูมิเนียม ( $\alpha$ -Al) และเฟสปฐมภูมิของเหล็ก  $Al_3Fe$  (Primary  $Al_3Fe$ ) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็ง มีเสถียรภาพทางความร้อน และมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี อย่างไรก็ตามโครงสร้าง  $Al_3Fe$  มีขนาดใหญ่ มีความแข็งเปราะ และกระจายตัวได้ไม่ดี ในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะส่งผลให้สูญเสียสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมเหล็ก ดังนั้นการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้มีความละเอียด สามารถทำได้โดยการเติมโลหะแม่ Al-Zr-Ti ช่วยส่งผลให้เกิดอนุภาคแข็งของ  $Al_3Zr$  หรือ  $Al_3(Zr, Ti)$  ซึ่งอนุภาคที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสของเกรนและทำให้โครงสร้างละเอียดมากขึ้น โดยความเข้มข้นของโลหะแม่ Al-Zr-Ti คือ 0.2 และ 0.4 wt.% ร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกในระหว่างกระบวนการหล่อ ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างมีความละเอียดและการกระจายตัวดีขึ้นส่งผลให้สมบัติความแข็ง การทนการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ความแข็งของอลูมิเนียมผสมเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายหลังผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง และพบว่า การนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นหลังจากที่ผ่านการบ่มแข็ง

<b>Thesis Title</b>	Development of Al-Fe Alloys by the addition of Al-Zr-Ti master Alloy and Ultrasonic Melt Processing
<b>Student</b>	MS. Pitchayapa Lertrit MS. Poorichan Wiwat MS. Hattaya Watananoi
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Dr.Suwaree Chankitmunkong

### ABSTRACT

The objective of this research is to study the influence of the addition of high concentration Al-Zr-Ti master Alloy with Ultrasonic Melt Processing on the microstructure, mechanical properties, electrical conductivity, and corrosion resistance of Al-Fe Alloy. Hypereutectic Al-Fe have received more attention in recent years due to the microstructure is consisted of aluminum grain ( $\alpha$ -Al) and primary  $Al_3Fe$  phase which is a hardened structure, thermally stability, and good electrical conductivity. However, the primary  $Al_3Fe$  is large, brittle, and distributes non-uniformly in the microstructure during solidification lead to decrease the mechanical properties of the Alloy. Therefore, microstructure refinement can be achieved with adding the Al-Zr-Ti Master Alloy. And solid particles of  $Al_3Ti$  or  $Al_3(Ti,Zr)$  can be formed during the solidification of the metal. The resulting particles act as grain nuclei and produce finer grain microstructures. And when combines with the ultrasonic melt process during the casting process. The results found that the refined primary  $Al_3Fe$  and eutectic colonies resulted in increased hardness properties, corrosion resistance, and electrical conductivity. Moreover, the hardness and electrical conductivity can be improved significantly by aging process at 375 and 400 degrees Celsius for 20 hrs.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กโดยการเติมโลหะแม่ อลูมิเนียม เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม และกระบวนการอัลตราโซนิก เป็นส่วนหนึ่งในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ ซึ่งสามารถสำเร็จบรรลุไปด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไข และให้คำปรึกษาในปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินปริญญานิพนธ์ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จสิ้นลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.สุวารี ชาญกิจมั่นคง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาแก่ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ที่มีความกรุณาเสียสละเวลาในการให้ความรู้ คำปรึกษา และคอยให้คำช่วยเหลือในระหว่างการปฏิบัติงาน จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปอย่างเรียบร้อย ถูกต้องสมบูรณ์ และลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมืองและวัสดุ และวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ในการปฏิบัติงาน อีกทั้งการดูแลระหว่างปฏิบัติงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และมีความปลอดภัยในระหว่างการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ ที่คอยช่วยเหลือรวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ ตลอดจนเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาแลกเปลี่ยนความรู้ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ทางคณะผู้ดำเนินงานหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทางด้านวัสดุ อุตสาหกรรม ยานยนต์ และมีส่วนช่วยในการพัฒนาความรู้ ความสามารถ ในด้านวิศวกรรมวัสดุของประเทศให้มีความก้าวหน้าในอนาคตต่อไป

นางสาวพิชญาภา เลิศฤทธิ์

นางสาวฐรีจันทร์ วิวัฒน์

นางสาวหทัย วัฒนน้อย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา .....	3
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ .....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	4
1.6 แผนการดำเนินงาน .....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 อลูมิเนียมผสมเหล็ก .....	6
2.1.1 การแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมผสมเหล็ก .....	7
2.2 การปรับสภาพเกรนละเอียด .....	10
2.2.1 อิทธิพลของธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาค.....	10
2.2.2 การปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยเทคนิคทางกล.....	13
2.3 กลไกการเพิ่มความแข็งแรงในอลูมิเนียม.....	16
2.3.1 อิทธิพลของธาตุผสมต่อสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม.....	16
2.3.2 อิทธิพลของการบ่มแข็ง (Aging Time) ต่อคุณสมบัติทางกล .....	18
2.4 การวิเคราะห์ต่างๆ .....	20
2.4.1 Optical Microscope (OM).....	20
2.4.2 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) .....	20
2.4.3 เทคนิค Scanning Election Microscope (SEM).....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.5 การทดสอบสมบัติทางกล .....	23
2.5.1 ความแข็ง (Hardness).....	23
2.5.2 การกัดกร่อนของวัสดุ (Corrosion).....	27
2.5.3 การทดสอบสภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity).....	43

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน

3.1 การเตรียมวัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	49
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการหล่อโลหะแม่และอลูมิเนียมผสม.....	49
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	49
3.1.3 แบบหล่อที่ใช้สำหรับการทดลอง .....	50
3.2 ขั้นตอนการทดลอง .....	51
3.2.1 ขั้นตอนการพัฒนาโลหะแม่ (Al-8wt%Zr-Ti master Alloy) .....	53
3.2.2 ขั้นตอนการพัฒนาอลูมิเนียมผสมอลูมิเนียม-เหล็กและกระบวนการอัลตราโซนิก .....	55
3.2.3 ขั้นตอนการหล่ออลูมิเนียมผสมเหล็กด้วยการเติมโลหะแม่ และกระบวนการอัลตราโซนิก .....	52
3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและการทดสอบสมบัติเชิงกล .....	57
3.3.1 การทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer: XRD).....	57
3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค (Macrostructure and Microstructure) ...	58
3.3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	58
3.3.4 การทดสอบการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity).....	58
3.3.5 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance).....	59

### บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti .....	62
4.2 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเหล็กเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก (Al-6Fe) .....	63
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe .....	63
4.3 อิทธิพลของการเติมโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti และการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ของอลูมิเนียมผสมเหล็ก .....	66

4.3.1 อิทธิพลของการเติมโลหะแม่และการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	
ต่อโครงสร้างจุลภาค .....	62
4.3.2 อิทธิพลของการเติมโลหะแม่และการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	
ต่อโครงสร้างมหภาค .....	63
4.4 อิทธิพลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อโครงสร้างยูเทคติกของอลูมิเนียมผสมเหล็ก .....	70
4.5 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเกรดไฮโปยูเทคติก (Al-1.6Fe) .....	72
4.5.1 อิทธิพลของกระบวนการอัลตราโซนิกต่อโครงสร้าง	
เฟสยูเทคติกของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe .....	72
ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr.....	73
4.6 สมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe .....	74
4.6.1 ความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสมเหล็ก (ชิ้นงานหล่อ) .....	74
4.6.2 ความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสมเหล็กที่ผ่านการบ่มแข็ง (As-Aging) .....	75
4.7 สมบัติการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe และ Al-1.6Fe .....	78
4.8 ความต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe .....	79
4.8.1 ความต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า .....	75
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	88
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	5
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบความแข็ง .....	27
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า .....	41
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $\rho(\Omega \cdot m)$ ) และค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $\sigma(S/m)$ ) ที่ 20° C .....	46
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการนำไฟฟ้า (%IACS) และความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ ( $\mu\Omega/cm$ ) ที่ 20° C .....	43
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะที่ใช้ในการทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก, wt.%) .....	52
ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า ( $E_{corr}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) ของอลูมิเนียมผสมเหล็กที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 wt.% .....	78

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของอลูมิเนียมผสมเหล็ก .....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคสำหรับตำแหน่งเดียวกัน.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง .....	9
รูปที่ 2.4 แผนภาพ EBSD grain reconstruction ของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม .....	11
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงอนุภาคของ Al <sub>3</sub> Zr phase ใน Al-0.4wt.%Zr .....	12
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงปริมาณการเติมโลหะแม่ในอลูมิเนียม (ก) การเติมปริมาณเซอร์โคเนียม .....	12
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของ A357 ที่มีการเติม Master Alloy .....	14
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงอิทธิพลของการใช้อัลตราโซนิก และการเติมไทเทเนียมในอลูมิเนียมผสมเซอร์โคเนียม .....	15
รูปที่ 2.9 องค์ประกอบเครื่องอัลตราโซนิก .....	16
รูปที่ 2.10 ความแข็งของอลูมิเนียมผสม Al และ Al-Fe .....	17
รูปที่ 2.11 แผนภาพโลหะบริสุทธิ์ Al และ Al-Fe แช่ใน NaCl 3.5% .....	18
รูปที่ 2.12 อิทธิพลการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 650 และ 700 K.....	18
รูปที่ 2.13 อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มแข็งในอลูมิเนียมผสม .....	19
รูปที่ 2.14 กล้อง Optical Microscope (OM).....	20
รูปที่ 2.15 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD).....	21
รูปที่ 2.16 เครื่อง Scanning Election Microscope (SEM).....	22
รูปที่ 2.17 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์.....	24
รูปที่ 2.18 การทดสอบความแข็งด้วยวิกเกอร์ .....	25
รูปที่ 2.19 การทดสอบความแข็งด้วยรีอ็อกเวลล์ .....	26
รูปที่ 2.20 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ .....	32
รูปที่ 2.21 การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์.....	32
รูปที่ 2.22 การกัดกร่อนแบบช่องแคบ.....	33
รูปที่ 2.23 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม.....	33
รูปที่ 2.24 การกัดกร่อนตามขอบเกรน.....	34
รูปที่ 2.25 การผุกร่อนแบบเลือก.....	34
รูปที่ 2.26 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ .....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.27 การกัดกร่อนโดยความเค้น.....	35
รูปที่ 2.28 แสดงเส้นโค้งของ LPR ความชันของเส้นแสดงความต้านทานโพลาไรซ์ (Rp).....	38
รูปที่ 2.29 เส้นกราฟ Polarization ที่ได้จากเทคนิค Potrtiodynamic Polarization.....	38
รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี.....	39
รูปที่ 2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ (Nyquist Plot).....	40
รูปที่ 2.32 เครื่องวัดค่าการนำกระแสไฟฟ้าวน HEC-101 .....	47
รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยแบบส่องกราด .....	51
รูปที่ 3.2 กระบวนการหล่อแบบเข้าหลอม .....	52
รูปที่ 3.3 กระบวนการอัลตราโซนิก .....	53
รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการหล่อโลหะแม่ (Master Alloy).....	53
รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการหล่ออลูมิเนียมผสมเหล็กและกระบวนการอัลตราโซนิก .....	55
รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	57
รูปที่ 3.7 การเตรียมชิ้นทดสอบการกัดกร่อน .....	59
รูปที่ 3.8 กระบุงแก้วบรรจุสำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	60
รูปที่ 3.9 การตั้งขั้วสายวงจรการทำงานของเครื่อง Poteniostat / Galvanostat.....	60
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยแบบส่องกราด .....	62
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe .....	63
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr.....	64
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr ที่ไม่ผ่านคลื่นอัลตราโซนิก .....	64
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	65
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr .....	65
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมผสม Al-6Fe.....	66
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมผสม Al-6Fe ที่มีการเติมเซอร์โคเนียม 0.2 และ 0.4 ตามลำดับ .....	67
รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe .....	68
รูปที่ 4.10 ขนาดเฉลี่ยของสารประกอบเชิงโลหะของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe .....	70
รูปที่ 4.11 โครงสร้างของเฟสยูเทคติกของอลูมิเนียมผสมเหล็ก.....	71
รูปที่ 4.12 ขนาดยูเทคติกโดยเฉลี่ยของอลูมิเนียมผสมเหล็ก.....	72

รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe .....	73
รูปที่ 4.14 ขนาดยูเทคติกโดยเฉลี่ยของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe .....	73
รูปที่ 4.15 การปรับสภาพเกรนละเอียดของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe .....	74
รูปที่ 4.16 ขนาดเกรนเฉลี่ยของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe.....	74
รูปที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมที่สภาวะหล่อ(As-Cast) .....	75
รูปที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมเหล็ก Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr, Al-6Fe-0.4Zr.....	76
รูปที่ 4.19 อิทธิพลของเซอร์โคเนียมที่มีผลต่อสมบัติความแข็งของอลูมิเนียมผสมเหล็ก.....	77
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของกระบวนการอัลตราโซนิค ต่อสมบัติความแข็งของโลหะอลูมิเนียมผสมเหล็กบ่มแข็ง .....	78
รูปที่ 4.21 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, %IACS) ของอลูมิเนียมผสม .....	79
รูปที่ 4.22 เส้นโค้งโพลาริเซชันของอลูมิเนียมผสมเหล็ก .....	81
รูปที่ 4.23 อัตราการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมเหล็ก .....	82
รูปที่ 4.24 วงจรสมมูล ECM ของเทคนิค EIS .....	84
รูปที่ 4.25 กราฟ Nyquist ของโลหะอลูมิเนียมผสมเหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	84

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด ขอบเขต และคำจำกัดความของงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาอลูมิเนียมผสม เหล็ก โดยการเติมโลหะแม่ อลูมิเนียม เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม และกระบวนการอัลตราโซนิก ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

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

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอลูมิเนียมผสมมีความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจและภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน และ การใช้งานภายในประเทศ เนื่องจากมีสมบัติที่น่าสนใจคือน้ำหนักเบา ความแข็งแรง ต่อหน่วยน้ำหนักสูง การนำความร้อนและไฟฟ้า และความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี [1] ซึ่งอลูมิเนียมผสมซิลิกอน (Hypereutectic Al-Si Alloy) เป็นกลุ่มที่มีการศึกษาและใช้งานในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีคือ ทำให้สมบัติการหล่อดี มีอัตราการหดตัวต่ำ ความต้านทาน การกัดกร่อนที่ดี มีความแข็งแรง ความแข็งแรงสูง แต่ความแข็งแรงต่อความเหนียวต่ำ อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่มีความต้องการใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีเพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยการพัฒนาอลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทคติกเหล็ก (Hypereutectic Al-Fe Alloy) ซึ่งนับว่าเป็นอลูมิเนียมเกรดใหม่ที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก อลูมิเนียมเกรดนี้ส่วนผสมของเหล็กมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเกรนอลูมิเนียม ( $\alpha$ -Al) และเฟสปฐมภูมิของเหล็ก  $Al_3Fe$  (Primary  $Al_3Fe$ ) [2] ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง มีเสถียรภาพทางความร้อน และช่วยเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลของอลูมิเนียมเกรดนี้ยังขึ้นกับโครงสร้างจุลภาค อลูมิเนียมที่มีโครงสร้างเกรนอลูมิเนียมและเฟสปฐมภูมิที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลต่อการสูญเสียสมบัติทางกล การนำไฟฟ้า และความต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากโครงสร้าง  $Al_3Fe$  มีความแข็งแรงเปราะและกระจายตัวได้ไม่ดีในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติของอลูมิเนียมผสมเกรดนี้ให้มีโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรน

ละเอียดเพื่อช่วยสมบัติทางกลและสมบัติการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ความแข็งแรง การนำไฟฟ้า ความเหนียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเติมโลหะแม่ที่เป็นตัวปรับสภาพเกรนละเอียด (Grain Refiner Master Alloy) ในอลูมิเนียมผสมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ได้ เช่น การเติมโลหะแม่ Al-Ti-B, Al-Zr-Ti และ Al-Ti-C เพื่อปรับสภาพเกรนละเอียดซึ่งพบว่าช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรงของโลหะได้ แต่ยังมีข้อเสียเรื่องการเกิดอนุภาคแข็ง TiC หรือ TiB<sub>2</sub> ซึ่งจะส่งผลต่อการเกาะกลุ่มของอนุภาคเหล่านี้ในโครงสร้างจุลภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นของเปอร์เซ็นต์ Ti หรือ Zr ในปริมาณน้อยจะส่งผลให้การเติมโลหะแม่ในปริมาณมากซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคแข็งหรืออนุภาคปนเปื้อน (Inclusion) และส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดในอลูมิเนียมอีกด้วย นอกจากนี้พบว่ามีการศึกษาการสังเคราะห์ตัวปรับสภาพเกรนละเอียด Al-Zr-Ti ด้วยปฏิกิริยาทางเคมีจากเกลือ K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> และ K<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub> หรือ การใช้โลหะแม่ Al-Zr ผสมกับ Al-Ti ในโลหะหลอมเหลวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็น Al-Zr-Ti โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเติม Al-Zr-Ti ในอลูมิเนียมผสมสามารถเกิดอนุภาคแข็งของ Al<sub>3</sub>Ti หรือ Al<sub>3</sub>(Ti, Zr) ในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ ซึ่งอนุภาคที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสของเกรนและทำให้โครงสร้างจุลภาคมีเกรนที่ละเอียดมากขึ้น

การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Melt Processing) เป็นกระบวนการหลอมด้วยการสั่นของคลื่นความถี่สูงมากกว่า 17 kHz ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโพรงอากาศขนาดเล็กในน้ำโลหะหลอมเหลว (Cavitation Melt Reaction) ซึ่งโพรงอากาศขนาดเล็กจะแตกตัวทำให้เกิดความดันในน้ำโลหะซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดกระจายตัวและการแตกหักของเดนไดรต์และอนุภาคแข็ง ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเติมโลหะแม่ Al-Zr-Ti (Al-Zr-Ti Master Alloy) ร่วมกับการใช้กระบวนการอัลตราโซนิก การเกาะกลุ่มของอนุภาคแข็ง การกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ ในชิ้นงาน หล่อได้มากขึ้น (Agglomerate of Nonmetallic Inclusions) เกรนมีความละเอียดมากขึ้นช่วยลดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อได้ (ความแข็งแรง, ความต้านทานแรงดึง, การยึดตัว) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ความเป็นรูพรุนลดลง [3] พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดได้ดี

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่พัฒนาอลูมิเนียมผสมเกรดใหม่ Al-Fe ที่มีการเติมโลหะแม่ Al-Zr-Ti ที่มีความเข้มข้นสูงร่วมกับการประยุกต์ใช้กระบวนการคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นสูง (High Concentrated Al-Zr-Ti) ต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดช่วยส่งผลต่อสมบัติทางกลเพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าที่ดี และความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งงานวิจัยนี้มีความท้าทายอย่างมาก เนื่องจากมีข้อจำกัดทั้งด้านของเทคนิคการเตรียมโลหะแม่ความเข้มข้นสูง การเติมธาตุผสมและเทคโนโลยีอัลตราโซนิกพร้อมเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลในอลูมิเนียมเกรดใหม่ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กเกรดใหม่ให้มีโครงสร้างจุลภาคเหมาะสมและสมบัติที่ดีสามารถทดแทน

การใช้อลูมิเนียมผสมซิลิกอนที่มีการใช้งานในปัจจุบัน เพื่อตอบโจทย์การพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ และเพื่อเพิ่มโอกาสการใช้อลูมิเนียมเกรดใหม่ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กเกรดใหม่ (Al-Fe Alloys) ที่มีโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลและการนำไฟฟ้าที่ดี มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโลหะแม่ Al-Zr-Ti ที่มีความเข้มข้นสูงต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดของโครงสร้างอลูมิเนียมผสมเหล็ก
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลการเติมโลหะแม่ Al-Zr-Ti ที่มีความเข้มข้นสูงร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล สมบัติการนำไฟฟ้า และความต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมเหล็ก

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. เตรียมโลหะอลูมิเนียมไฮเปอร์ยูเทคติกเหล็กผสม 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Hypereutectic Al-6 wt.% Fe Alloys) จากโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.98 wt.% Al Alloys) และ อลูมิเนียมผสมเหล็ก (Al-20 wt.% Fe Binary Alloys)
2. เตรียมโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นสูง Al-8 wt.% Zr-1.6 wt.% Ti จากโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.98 wt.% Al Alloys), โลหะแม่ Al-10 wt.% Zr และ Al-10 wt.% Ti
3. ทดลองเติมโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นต่างกันที่ 0.2 และ 0.4 wt.% Zr พร้อมด้วยการใช้กระบวนการอัลตราโซนิกในน้ำโลหะหลอมเหลวอลูมิเนียมไฮเปอร์ยูเทคติกเหล็ก 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
4. วิเคราะห์การปรับสภาพของเกรนละเอียด (Grain Refinement) และการเกิดสารประกอบโลหะ (Intermetallic)
5. ทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติด้านต่างๆ ได้แก่ ทดสอบความแข็ง (Hardness Testing), ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Testing) และ การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)
6. วิเคราะห์และอภิปรายผลของโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติด้านต่างๆ และสรุปผลการทดลอง

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นสูง Al-8 wt.% Zr-1.6 wt.% Ti จากการหลอมโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.98 wt.% Al Alloys), โลหะแม่ Al-10 wt.% Zr และ Al-10 wt.% Ti
2. เตรียมอลูมิเนียมผสมหลัก คือ โลหะอลูมิเนียมไฮเปอร์ยูเทคติกเหล็กผสม 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Hypereutectic Al-6 wt.% Fe Alloys) จากการหลอมโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.98 wt.% Al Alloys) และ อลูมิเนียมผสมเหล็ก (Al-20 wt.% Fe Binary Alloys)
3. เตรียมโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นต่างกันที่ 0.2 และ 0.4 wt.% Zr ลงในน้ำโลหะหลอมเหลวอลูมิเนียมไฮเปอร์ยูเทคติกเหล็ก 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมด้วยการใช้กระบวนการอัลตราโซนิก
4. นำอลูมิเนียมผสมจากกระบวนการหลอมมาทำการตัดชิ้นงานและเตรียมผิวสำหรับการวิเคราะห์
5. นำชิ้นงานมาศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) และด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electronic Microscopy; SEM) พร้อมทั้งวิเคราะห์การเกิดเฟสของอลูมิเนียมผสมเหล็กและสารประกอบเชิงโลหะด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS))
6. วิเคราะห์และระบุชนิดของการเกิดสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
7. ทำการทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical properties) โดยทดสอบความแข็ง (Vickers Hardness Testing) ทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance Testing) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาอลูมิเนียมผสมเกรดใหม่ Al-Fe ที่มีโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานทดแทนอลูมิเนียมผสมเกรดเดิมในปัจจุบันซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มโอกาสการใช้งานอลูมิเนียมผสมเกรดใหม่ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในอนาคตได้
2. สามารถพัฒนาโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียด พร้อมทั้งสามารถเกิดสารประกอบของโลหะที่จะช่วยทำหน้าที่เป็นอนุภาคแข็งเสริมแรงในอลูมิเนียมผสมได้ ซึ่งเป็นการพัฒนาในด้านของอุตสาหกรรมหล่อโลหะอลูมิเนียม ให้สามารถผลิตโลหะแม่ที่มีความเข้มข้นสูงเพื่อช่วยลดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์หล่อ

3. ทราบถึงกระบวนการในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเกรนให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นด้วยการเติมธาตุผสมและเทคนิคคลื่นอัลตราโซนิกที่จะช่วยส่งผลต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานการกัดกร่อน และสมบัติการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

4. เรียนรู้และเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของอลูมิเนียมผสมในเกรดต่างๆและแนวทางพัฒนาสมบัติของอลูมิเนียมผสมเหล็กเกรดใหม่ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานโลหะเบาของอุตสาหกรรมต่างๆ ในอนาคต

## 1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2564					พ.ศ. 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.
1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
3. กำหนดวัตถุประสงค์ขอบเขตและผลที่คาดว่าจะได้รับ										
4. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง										
5. เตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิก										
6. นำชิ้นงานไปทำการทดสอบและทำการวิเคราะห์ - โครงสร้างทางโลหะวิทยา - สมบัติเชิงกล (ความแข็ง) - การต้านทานการกัดกร่อน										
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง										
8. สรุปผลการทดลอง										
9. เรียบเรียงเนื้อหาและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

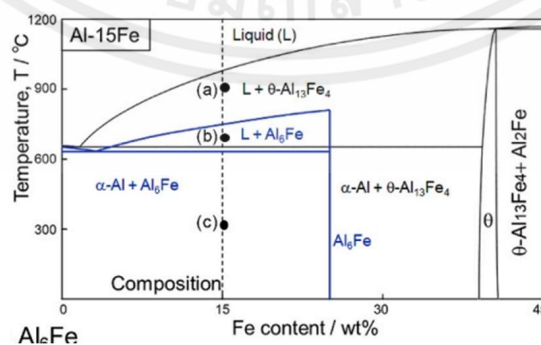
## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กด้วยการเติมโลหะแม่และกระบวนการอัลตราโซนิก มีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวกับอลูมิเนียมผสมเหล็ก อิทธิพลของโลหะแม่ อลูมิเนียม-เซอร์โคเนียม-ไทเทเนียม กระบวนการอัลตราโซนิกการตรวจสอบวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิควิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การทดสอบความแข็ง ทดสอบแรงดึง การทดสอบสมบัติการทนต่อการกัดกร่อน และการทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า

1. อลูมิเนียมผสมเหล็ก
2. การปรับสภาพเกรนละเอียด
3. กลไกการเพิ่มความแข็งแรงในอลูมิเนียม
4. การวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคต่างๆ (OM, XRD, EDS, SEM)
5. การทดสอบสมบัติทางกล

### 2.1 อลูมิเนียมผสมเหล็ก

อลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีสมบัติที่เด่นคือ น้ำหนักเบา มีความเหนียวสูง ความแข็งแรงสูง สมบัติการนำไฟฟ้าดี ต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก และอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำ มีลักษณะหลายประการที่แตกต่างจากอลูมิเนียมโดยเฉพาะด้านโครงสร้าง สมบัติเชิงกล เช่น ประสิทธิภาพในการเพิ่มความต้านทานการรั่วขณะร้อน ดังนั้นการผสมกันระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กจึงมีปริมาณจำกัด เนื่องจากถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยทั่วไปการเติมเหล็กในปริมาณที่สูง อาจส่งผลให้เสียต่อสมบัติทางกลสูง ดังนั้นปริมาณที่แนะนำนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเติมเหล็กในปริมาณสูง



รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของอลูมิเนียมผสมเหล็ก [4]

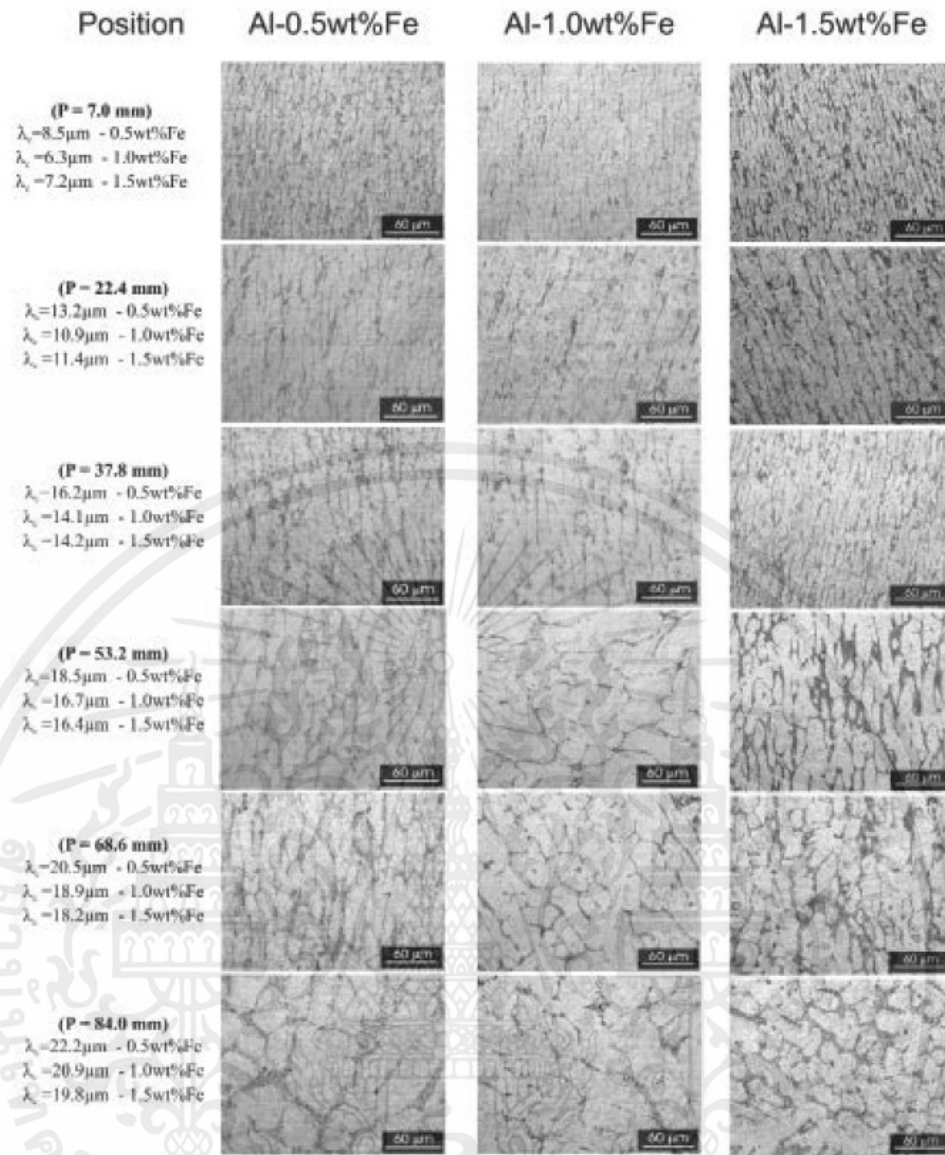
### 2.1.1 การแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมผสมเหล็ก

อลูมิเนียมผสมเหล็กแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [4] ได้แก่ อลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก (Hypo-Eutectic Alloys), อลูมิเนียมผสมยูเทคติก (Eutectic Alloys) และ อลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (Hyper-Eutectic Alloys)

#### 2.1.1.1 อลูมิเนียมผสมเหล็กไฮโปยูเทคติก

อลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทคติกคืออลูมิเนียมผสมที่มีองค์ประกอบอยู่เหนือจุดยูเทคติก และมีอลูมิเนียมผสมเหล็กน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในอลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทคติก เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบ อลูมิเนียมผสมหลักจะละลายได้ในสารตั้งต้นซึ่งเรียกว่าองค์ประกอบยูเทคติก และส่วนที่เหลือไม่ละลายซึ่ง เรียกว่าองค์ประกอบหลัก [5] ซึ่งในส่วนของไฮโปยูเทคติกจะไม่พบการเกิด Primary phase ของ Fe แต่พบ โครงสร้างยูเทคติกของ (Al) +  $Al_3Fe$  โดยทั่วไปอลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติกจะปรับแต่งขนาดของผลึก อลูมิเนียมโดยการปรับแต่งเกรนสำหรับการใช้งานที่ต้องการสมบัติทางกลที่ดี [6] โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ ทำการศึกษา อิทธิพลของขนาดเซลล์และการกระจายเฟสระหว่างเซลล์ที่มีผลต่อโครงสร้างที่เกิดจากความล้า (Nf) ของอลูมิเนียมผสม Al-0.5, 1.0 และ 1.5 wt.% Fe ที่ทำให้แข็งตัวตามทิศทาง ใช้ระบบการทำให้แข็งตัว ในทิศทางเดียวขึ้นในแนวตั้งที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อจัดเตรียมการหล่อ ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยอลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe เป็นตระกูลของอลูมิเนียมผสมหล่อที่โดดเด่นด้วยการเติบโตของเซลล์ ต้นทุนต่ำ และมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ประเมินค่าได้ จากรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เรียงตัวกันหลายแบบที่ได้สำหรับอลูมิเนียมผสมที่ตรวจสอบแต่ละรายการและตำแหน่งที่แตกต่างกันตามการหล่อ ตำแหน่งเหล่านี้เป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบความล้า สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าการจัดเรียงของเซลล์มีผลเหนือกว่าในตัวอย่าง ที่ตรวจสอบทั้งหมดที่แข็งตัวภายใต้สภาวะที่ไม่คงที่

จากรูปที่ 2.2 สารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) คล้ายแท่ง  $Al_6Fe$  ที่ไม่สมดุลมักจะเกี่ยวข้องกับ ช่วงของอัตราการทำความเย็นที่สูงในระหว่างการแข็งตัวตาม Goulart และคณะ การแข็งตัวที่ระบายความร้อน ด้วยน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้ สามารถผลิตโครงสร้างแบบหล่อที่มีความแข็งแรงของอนุภาค  $Al_6Fe$  แพร่กระจาย ค่าระยะห่างเซลล์เพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า หากเปรียบเทียบตำแหน่งแรกกับตำแหน่งที่ใกล้กับส่วนบนสุดของ การหล่อทั้งสาม พฤติกรรมนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทางความร้อน ซึ่งมีที่มาจาก การแข็งตัว เช่น อัตราการเย็นตัวปลายซึ่งลดลงเมื่อการแข็งตัวเกิดขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคสำหรับตำแหน่งเดียวกันซึ่งประเมินระหว่างทดสอบความล้าของอลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe P คือตำแหน่งจากพื้นผิวโลหะ/แม่พิมพ์และ  $\lambda_c$  คือระยะห่างระหว่างเซลล์ [7]

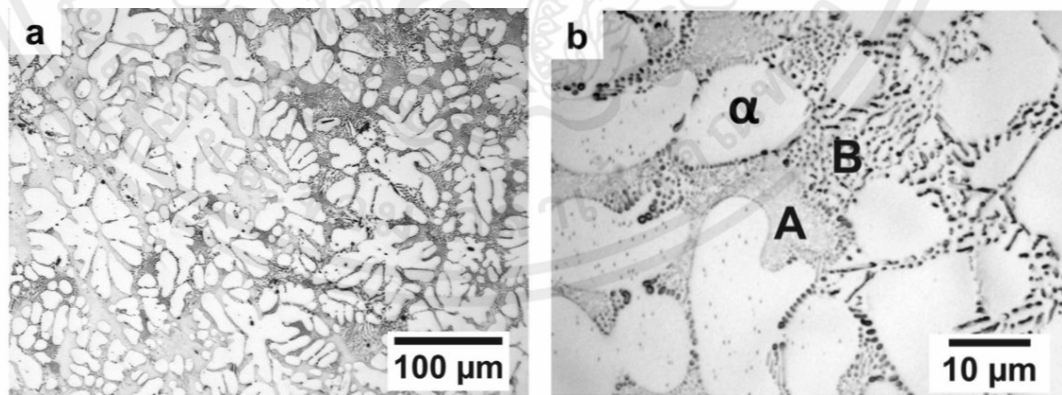
โดยพบว่าช่วงขององค์ประกอบไฮโปยูเทคติก โครงสร้างจุลภาคที่แข็งตัวประกอบด้วยเมทริกซ์เซลล์ที่อุดมไปด้วยอลูมิเนียม ( $\alpha$ ) ล้อมรอบด้วยส่วนผสมของยูเทคติก  $\alpha + \beta$  โดยที่  $\alpha$  อุดมไปด้วยอลูมิเนียมและ  $\beta$  ถูกเสริมประสิทธิภาพด้วย Al<sub>6</sub>Fe ที่เป็นโลหะระหว่างกัน โดยมีลักษณะทางสัณฐานคล้ายแท่งคล้ายแท่งในอลูมิเนียมผสมที่ตรวจสอบทั้งหมด ระยะห่างของเซลล์จะแปรผัน ตั้งแต่ 7-20  $\mu\text{m}$  จากตำแหน่งแรก (ละเอียด) ไปจนถึงด้านบนของการหล่อ (หยาบ) และความหนาแน่นของเส้นใย Al<sub>6</sub>Fe สูงขึ้นสามารถสังเกตได้จากอลูมิเนียมผสม Al-1.0 และ 1.5 wt.% Fe ซึ่งส่งผลให้ค่าความล้าที่สูงขึ้นที่เกี่ยวข้องกับอลูมิเนียมผสมดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมผสม Al-0.5 wt.% Fe ความละเอียดของเซลล์ยังสามารถเพิ่มค่าความล้าเนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใย Al-Fe ที่เป็นเนื้อเดียวกันภายในบริเวณระหว่างเซลล์ [7]

### 2.1.1.2 อลูมิเนียมผสมเหล็กยูเทคติก

อลูมิเนียมผสมเหล็ก 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันของสาร ที่ละลายหรือแข็งตัวที่อุณหภูมิเดียวซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวขององค์ประกอบใด ๆ อุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิยูเทคติก เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำสุดที่เป็นไปได้ที่อุณหภูมิ 652-655 องศาเซลเซียส ลักษณะของการเกิดยูเทคติกมีลักษณะเป็นจุดๆเกาะกลุ่มกันอยู่ภายในเฟส [4] โดยพบการเกิดของเฟสยูเทคติกของ Metastable Al+Al<sub>6</sub>Fe และ Stable Al+Al<sub>3</sub>Fe ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [10]

Jorge M. และคณะ [10] ทดลองเติมเหล็กในอลูมิเนียมผสมในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 2 และ 4 wt.% จากการศึกษาโครงสร้างของ Al-2 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สามารถมองเห็น  $\alpha$ -Al ที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน (Dendritic) ที่ถูกล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติก เมื่อสังเกตด้วยมุมมองที่ขยายสูงขึ้นจากรูปที่ 2.3 (ข) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างยูเทคติกมี 2 โครงสร้างที่ต่างกันโดยเปรียบเทียบจากความสว่างกว่าและเข้มกว่าตามที่มีเครื่องหมาย A และ B ซึ่งตรงกับบริเวณของยูเทคติก Al + Al<sub>6</sub>Fe และ Al + Al<sub>3</sub>Fe ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ XRD ยืนยันการมีอยู่ของทั้งเฟส Al<sub>6</sub>Fe และ Al<sub>3</sub>Fe และจากการวิเคราะห์ผลพบว่าการเกิดขึ้นของ Al<sub>3</sub>Fe ส่งผลทำให้มีลักษณะแข็งและเปราะ และการเกิดขึ้นของเฟส Al<sub>6</sub>Fe ที่กระจายอย่างละเอียดส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

อลูมิเนียมผสมเหล็กยูเทคติกนั้น ให้สมบัติที่ดีระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกมีส่วนการปรับสภาพเกรนที่สูงและไม่มีการเกิดขึ้นของ Intermetallic ที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกหักระหว่างการทดสอบแรงดึง [10] นอกจากนี้โครงสร้างยูเทคติกยังส่งผลต่อความแข็งแรงและการยึดตัวให้มีค่าที่สูงขึ้นอีกด้วย [9]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง Al-2% Fe และ (ข) มุมมองขยายแสดงการเกิดขึ้นของเฟส:

$\alpha$ - Al, (A) Al+Al<sub>6</sub>Fe eutectic, (B) Al+Al<sub>3</sub>Fe eutectic. [10]

### 2.1.1.3 อลูมิเนียมผสมเหล็กไฮเปอร์ยูเทคติก

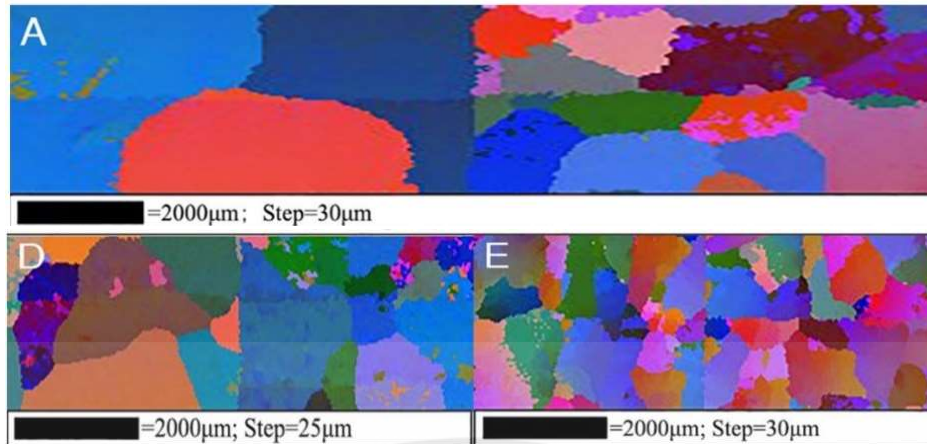
อลูมิเนียมผสมเหล็กมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดีและหากการเติมเหล็กยังช่วยในการปรับปรุงความเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้าง UFG (Ultrafine-grained) ซึ่งสามารถรับรู้สมบัติมัดตีฟังก์ชันด้วยการผสมผสานระหว่างการนำไฟฟ้าที่ดีและมีความแข็งแรงสูง อีกทั้งงานวิจัย Asiful H. Seikh และคณะ [12] มีการพัฒนาด้วยกระบวนการเทคนิคการผสมเชิงกลไก (MA) โดยเริ่มจากโลหะชนิดผง โดยศึกษาจากการเติม Al-X wt.% Fe ที่  $x = 2\%$ ,  $5\%$  และ  $10\%$  ค้างไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ที่ Al-10 wt.% Fe เมื่อทำการศึกษาด้วยการวิเคราะห์ SEM โดยตรวจสอบสภาพการกัดกร่อนมีค่าการเกิดการสึกกร่อนที่เล็กน้อย เมื่อเทียบกับ Al บริสุทธิ์ ที่แสดงให้เห็นเป็นลักษณะหลุมอุกบาตออกมา และเมื่อทำการยืนยันผลของการสึกกร่อนโดยการส่องกล้อง XRD พบว่าในโลหะ Al-10 wt.% Fe พบ peak ของ  $\gamma$  -  $Fe_2O_3$  และ  $\alpha$  -  $Al(OH)_3$  เมื่อเทียบกับ Al บริสุทธิ์ พบว่ามีเฉพาะ peak ของ  $\alpha$  -  $Al(OH)_3$  และจากอีกงานวิจัยศึกษาผลกระทบจากการเติม Fe เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม Al-Fe โดยศึกษาการเติมปริมาณ Fe ที่แตกต่างกันได้แก่ Al-8 wt.% Fe, Al-10 wt.% Fe, และ Al-12 wt.% Fe เมื่อทำการสังเกตด้วยการวิเคราะห์ SEM เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ Al-Fe โดยแสดงการกระจายของเฟส  $Al_{13}Fe_4$  พบว่ายิ่งเปอร์เซ็นต์มากกว่า 10 wt.% Fe ทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น ความเหนียวของวัสดุลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณ Fe และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

## 2.2 การปรับสภาพเกรนละเอียด

จากงานวิจัยของ Kori และคณะ [37] โดยการทดลองการเติมโลหะแม่ชนิด Al-5Ti-1B ปริมาณ 0.2, 0.4 และ 0.6 wt.% ลงในอลูมิเนียมผสม 7 wt.%Si พบว่าการเติมโลหะแม่ 0.6 wt.% ทำให้ขนาดขนาดของผลึกละเอียดที่สุดประมาณ 150 ไมครอน ในทุกเวลาค้ำน้ำโลหะในเบ้า ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าผลเสียที่เกิดจากการเติมซิลิกอนถูกกำจัดได้โดยการเติมโลหะแม่ปริมาณมากขึ้น เพื่อให้เกิดนิวเคลียสเพียงพอ

### 2.2.1 อิทธิพลของธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตพบว่า อิทธิพลของเซอร์โคเนียมต่ออลูมิเนียม มีผลต่อขนาดของเกรนซึ่งเป็นส่วนทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นหากขนาดของเกรนมีความละเอียดมาก

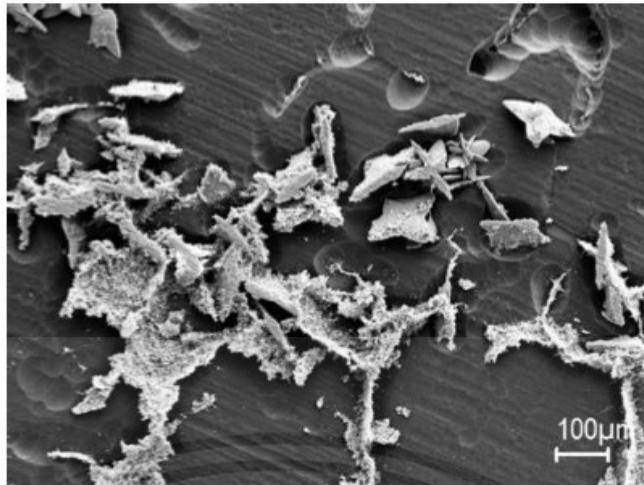


รูปที่ 2.4 แผนภาพ EBSD grain reconstruction ของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมในการทำให้แข็งตัวโดยอิสระ (A) purity Al (D) Al-0.1wt.% Zr (E) Al-0.2wt.% Zr [14]

จากงานวิจัยของ Zhongwei Chen และ Kang Yan [14] ทำการศึกษาวิจัยพบว่าการเติมเซอร์โคเนียมในอลูมิเนียมอัลลอยด์ทำให้เกิดการควบคุมการเกิดผลึกซ้ำ เพิ่มสมบัติเชิงกลและความเสถียรภาพทางความร้อน และยังสามารถควบคุมขนาดของเกรนในระหว่างการแข็งตัว โดยพบว่าการเติมเซอร์โคเนียมในอลูมิเนียมขนาดของเกรนมีความละเอียดมากกว่าอลูมิเนียมอัลลอยด์เพียงอย่างเดียวและพบว่าการเติมเซอร์โคเนียมในปริมาณที่แตกต่างกันยังมีส่วนช่วยให้เกรนมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น แต่หากเติมในปริมาณที่มากเกินไปอาจก่อให้เกิดเกรนที่มีความหยาบและมีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้เซอร์โคเนียมในปริมาณ 0.1 และ 0.2 wt.% Zr พบว่าที่ปริมาณ 0.2 wt.%Zr ทำให้เกรนมีความละเอียดมากกว่าปริมาณที่ 0.1 wt.%Zr ดังรูปที่ 2.4

การเติมเซอร์โคเนียมลงในอลูมิเนียมทำให้เกิดเฟสชนิดหนึ่งเกิดขึ้นคือเฟส  $Al_3Zr$  ซึ่งเป็นตัวช่วยให้ขนาดของเกรนมีความเล็กลง โดยจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของ Dmitry Eskin [15] ได้อธิบายเกี่ยวกับอิทธิพลของเซอร์โคเนียมที่มีผลต่อการปรับแต่งเกรนของอลูมิเนียมอัลลอยด์ พบว่าเมื่อมีการเติมเซอร์โคเนียมในอลูมิเนียมอัลลอยด์ทำให้เกิดเฟส  $Al_3Zr$  เกิดขึ้นโดย 2 กรณี โดยกรณีแรกความอิมิตวียังยวดของสารละลาย Al ที่เป็นของแข็ง จะเกิดขึ้นได้ในระหว่างการแข็งตัว และเฟส  $Al_3Zr$  แพร่กระจายได้จะเกิดการตกตะกอนระหว่างการหลอม, การตรึงความคลาดเคลื่อน (Pinning Dislocations) และ Subgrain Boundaries และกรณีสุดท้าย ผลึกปฐมภูมิของเฟส  $Al_3Zr$  ที่สมดุลจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของนิวเคลียสสำหรับเกรนของอลูมิเนียม

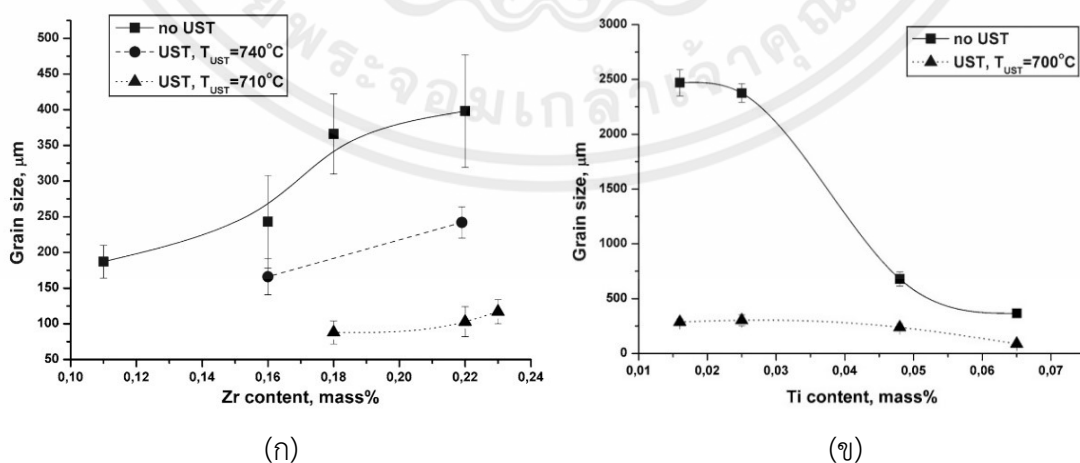
แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยได้กล่าวอีกว่า อนุภาคของ  $Al_3Zr$  นั้นควรมีขนาดค่อนข้างเล็กเพื่อให้เพิ่มประสิทธิภาพในการช่วยการปรับแต่งเกรนมากยิ่งขึ้น และยังคงพบปัญหาของอนุภาค  $Al_3Zr$  คือการเกิดอนุภาคขนาดเล็กในช่องว่างระหว่างเดนไดรต์ ซึ่งอาจทำให้เกรนมีขนาดไม่สม่ำเสมอและเกิดโพรงอากาศระหว่างเกรนได้ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงอนุภาคของ  $Al_3Zr$  phase ใน Al-0.4wt.%Zr [15]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่พบปัญหาในการเติมเซอร์โคเนียมในโลหะอลูมิเนียมผสม เนื่องจากการเติมเซอร์โคเนียมไม่สามารถทำให้ขนาดของเกรนมีความละเอียดมากและไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังไม่สามารถแก้ไขโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในอลูมิเนียมผสมอลูมิเนียมได้อีกด้วย และหากเติมในปริมาณที่มากเกินไปกลับทำให้เกรนมีความหยาบเพิ่มมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อเชิงกลต่างๆลดลง

จากข้อมูลงานวิจัยของ T.V.Atamanenko และคณะ [16] ทำการวิจัยพบว่าการเติมเพียงเซอร์โคเนียมเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถช่วยให้ประสิทธิภาพของอลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นอีกทั้งยังพบปัญหาในเรื่องของการเกิดโพรงอากาศหรือรูพรุนในพื้นที่ผิวของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมได้เท่าที่ควร ทางคณะวิจัยจึงได้ศึกษาการเติมธาตุไทเทเนียมลงไปเพียงเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักไทเทเนียมในปริมาณเล็กน้อยหรือในอัตราส่วน 4:1 ( Zr : Ti ) โดยทำการเติม 0.015wt.%Ti พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไทเทเนียมมากขึ้นทำให้ขนาดเกรนลดลงมากกว่าการเติมเซอร์โคเนียมในอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงปริมาณการเติมโลหะแมลงในอลูมิเนียม (ก) การเติมปริมาณเซอร์โคเนียม

(ข) การเติมปริมาณไทเทเนียม [16]

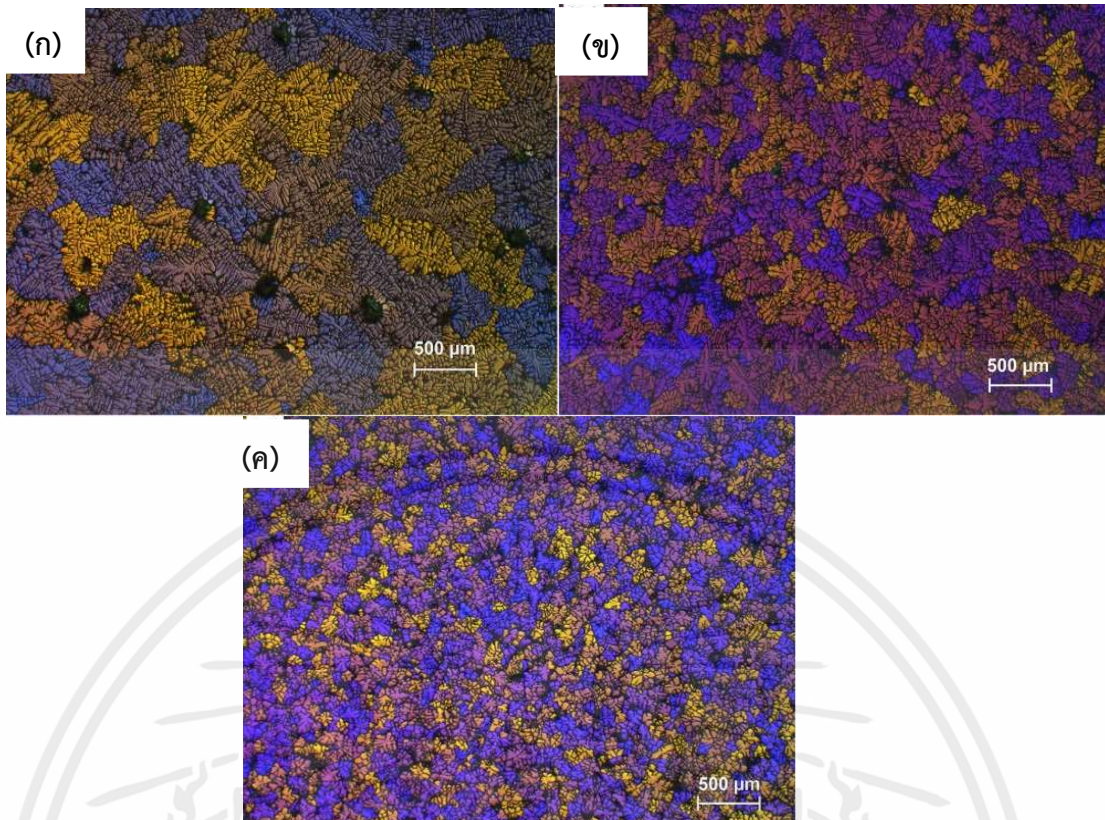
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมไทเทเนียมในอลูมิเนียม-เซอร์โคเนียม ยังช่วยเรื่องการปรับแต่งเกรนด้วยอนุภาค  $Al_3Zr$  โดยไทเทเนียมอิสระอาจทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบในการกำจัดคาร์ไบด์ของเกรนอลูมิเนียม และยังช่วยให้  $Al_3Zr$  มีอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีลักษณะรูปร่างที่คล้ายเข็มอาจทำให้เกิดความเค้นภายในการแข็งตัวของโลหะและทำให้การแตกร้าวและแยกส่วนเป็นไปได้ง่ายขึ้น

## 2.2.2 การปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยเทคนิคทางกล

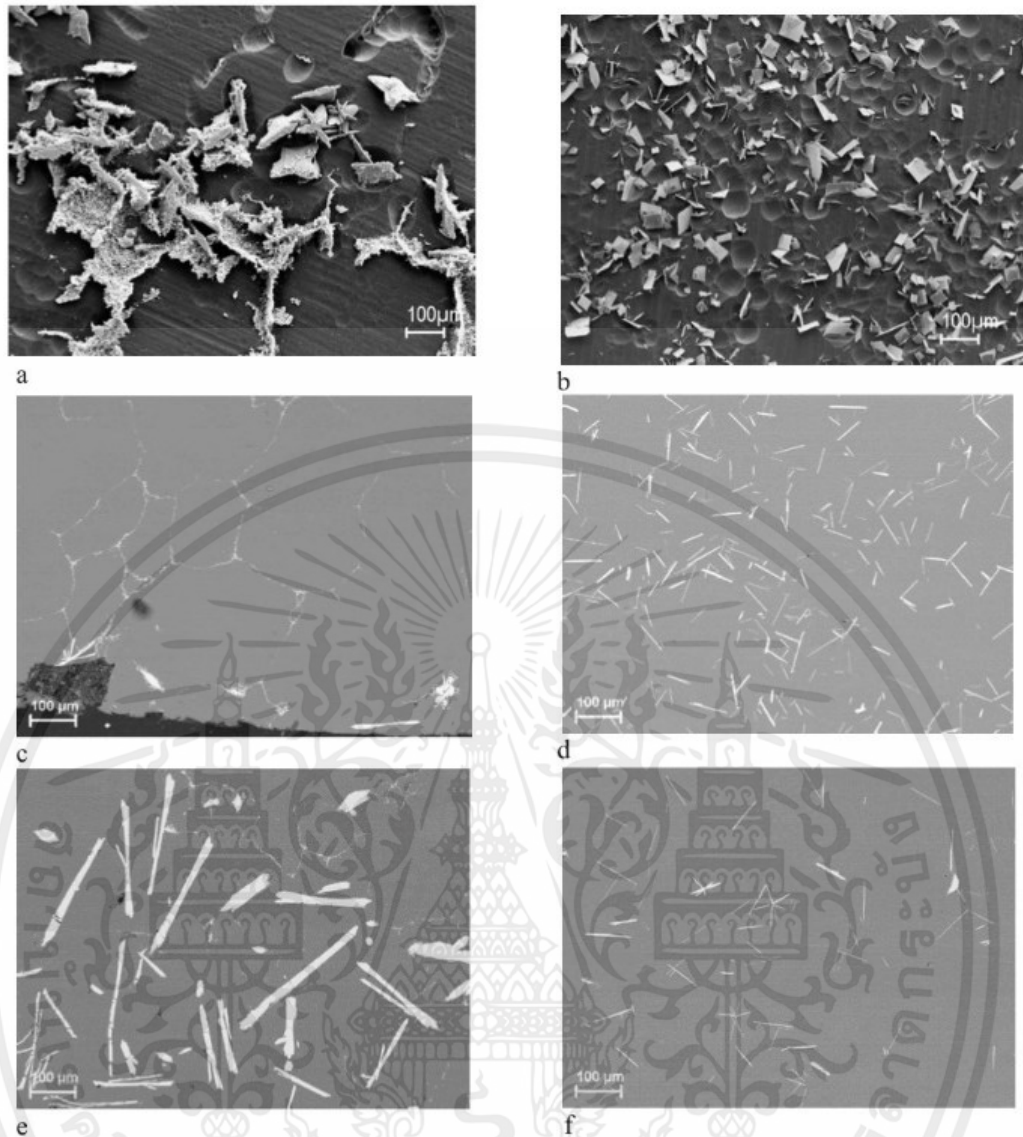
### 2.2.2.1 กระบวนการอัลตราโซนิก (Ultrasonic Melt Processing)

การปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค โดยการใช้กระบวนการคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Melt Processing) คือ กระบวนการหลอมด้วยการสั่นของคลื่นความถี่สูงมากกว่า 17 kHz ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาแคปพิเทชันของการหลอมเหลว (Cavitation of Melt) การผสมเพื่อให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันของโลหะเหลว ยังทำให้เกิดกระจายตัวและการแตกหักของเดนไดรต์ โดยข้อดีของการใช้การบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก คือ การกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ และการจับกลุ่มของอนุภาค ไม่เป็นก้อนเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น ผลกระทบทางบวกแก่สมบัติเชิงกล (ความแข็ง, ความต้านทานแรงดึง SDAS, การยึดตัว) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ความเป็นรูพรุนลดลง นอกจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการพัฒนาใช้กระบวนการกวน (Stir Casting) ก่อนกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Melt Processing) เป็นวิธีการที่ทำให้คุณภาพเชิงกลดีขึ้นและมีการกระจายของอนุภาคที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น อีกทั้งทำให้ขนาดของเกรนมีความละเอียดมากขึ้น และการศึกษาจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกล [18]



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของ A357 ที่มีการเติม Master Alloy  
 (ก) Al-2wt%Zr-0.5wt%Ti (No UST), (ข) Al-2wt%Zr-0.5wt%Ti (Use UST) และ  
 (ค) Al-5wt%Zr-1.25wt%Ti (Use UST)

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการนำกระบวนการอัลตราโซนิกมาใช้ในการปรับสภาพโครงสร้างเกรนให้มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยจากผลงานวิจัยของ V.M. Sreekumar และคณะ [19] พบว่าการใช้การบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกเป็นส่วนช่วยในการปรับสภาพโครงสร้างเกรนให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยการใช้คลื่นความถี่มากกว่า 17 kHz ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนต่ออนุภาค ทำให้เกิดการแตกตัวและกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Ultrasonication ในอลูมิเนียมผสมอลูมิเนียมหลอมละลาย พบว่ามีเกรนลดขนาดและเปลี่ยนสัณฐานวิทยาของ intermetallic จากรูป 2.7 ทำให้ทราบว่าการใช้กระบวนการอัลตราโซนิกทำให้ขนาดของเกรนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการเติมด้วย Master Alloys และช่วยให้เกรนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อีกทั้งยังลดการเกิดรอยแตกหรือการเกิดรูพรุนในพื้นที่ผิวของวัสดุ

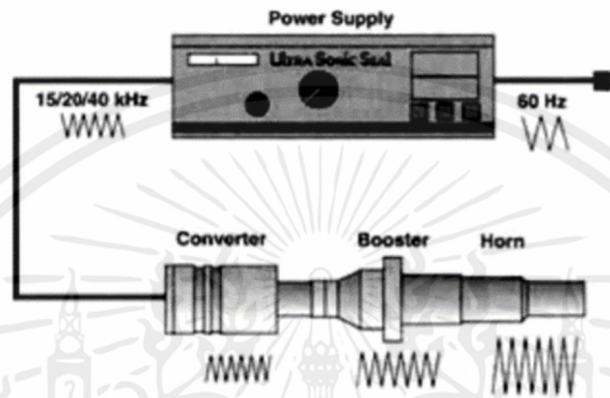


รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงอิทธิพลของการใช้อัลตราโซนิกและการเติมไทเทเนียมในอลูมิเนียมผสมเซอร์โคเนียมต่อการก่อตัวของเฟส  $Al_3Zr$  ในระหว่างการแข็งตัว (a) Al-0.4% Zr, deep etched (note primary  $Al_3Zr$  flat dendrites and fine grain-boundary crystals), (b) Al-0.4% Zr Ti, USP (note plate shaped primary Al Zr), (c) Al-0.4% Zr (d) Al-0.4% Zr, USP, (e) Al-0.4% Zr-0.1% Ti and (f) Al-0.4% Zr-0.1% Ti, USP.

อีกทั้งการใช้กระบวนการอัลตราโซนิกยังช่วยทำให้เฟส  $Al_3Zr$  มีขนาดเล็กและเกิดการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น โดยยังมีการกระจายตัวดีทำให้เพิ่มสมบัติทางกลได้ดีขึ้น จากงานวิจัยของ D. Eskin ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้กระบวนการอัลตราโซนิกเพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้อัลตราโซนิกและการเติมไทเทเนียมในอลูมิเนียม-เซอร์โคเนียมต่อการก่อตัวของเฟส  $Al_3Zr$  ในระหว่างการแข็งตัว ดังรูปที่ 2.8

โดยองค์ประกอบของเครื่องอัลตราโซนิกประกอบด้วยกัน 4 ส่วนหลักๆดังนี้

1. Ultrasonic Power Supply (Generator) ทำหน้าที่ให้กำเนิดแหล่งไฟฟ้า
2. Converter (Transducer) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
3. Booster (Optional) ทำหน้าที่เพิ่มแอมพลิจูด หรือเป็นตัวขยายสัญญาณแอมพลิจูด
4. Probe (Horn) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งผ่านคลื่นสัญญาณความถี่ไปยังของเหลว



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบเครื่องอัลตราโซนิก

#### 2.2.2.2 กระบวนการกวน (Stir Casting)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ากระบวนการกวน (Stir Casting) เป็นกระบวนการผสมวัสดุโดยใช้ใบพัดในการผสมวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปเข้าด้วยกัน ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นวิธีการผสมวัสดุแบบง่ายและมีต้นทุนต่ำ แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ การกระจายตัวของวัสดุผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกรนที่ได้มีความละเอียดไม่มากนัก ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคโลหะและอลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ และก่อให้เกิด Intermetallic จำนวนมาก นอกจากนี้อาจมีการรวมกลุ่มในบางส่วนเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นและการเกิดรูพรุนซึ่งทำให้สมบัติของวัสดุลดลง จากการปรับปรุงโดยการเติมอนุภาคเสริมแรงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลให้ดีขึ้น [17]

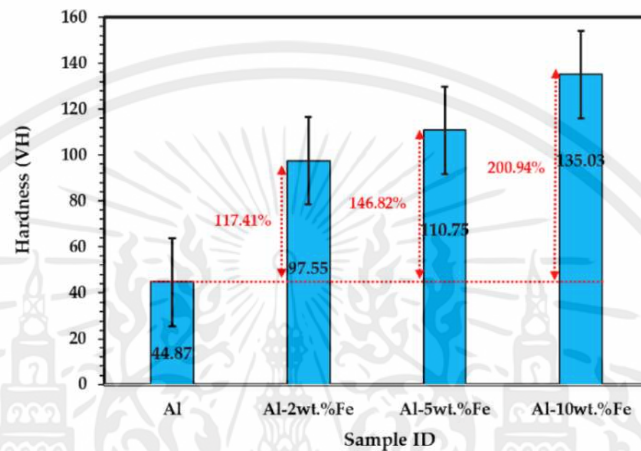
### 2.3 กลไกการเพิ่มความแข็งแรงในอลูมิเนียม

#### 2.3.1 อิทธิพลของธาตุผสมต่อสมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม

##### 2.3.1.1 สมบัติความแข็ง (Hardness)

จากงานวิจัย Asiful H. Seikh และคณะ [12] การศึกษาความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสม Al-Fe เมื่อมีการเติม Fe เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของ Al-Fe มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการก่อตัวที่ผลึกนาโนด้วยการปรับแต่งผลึกเกรน ความแข็งแรงของ Al pure, Al-2 wt.%Fe, Al-5 wt.%Fe และ Al-10 wt.%Fe ความแข็งแรงของ Al pure, Al-2 wt.%Fe, Al-5 wt.%Fe และ Al-10 wt.%Fe ถูกพบว่าเป็น 44.87, 97.55, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

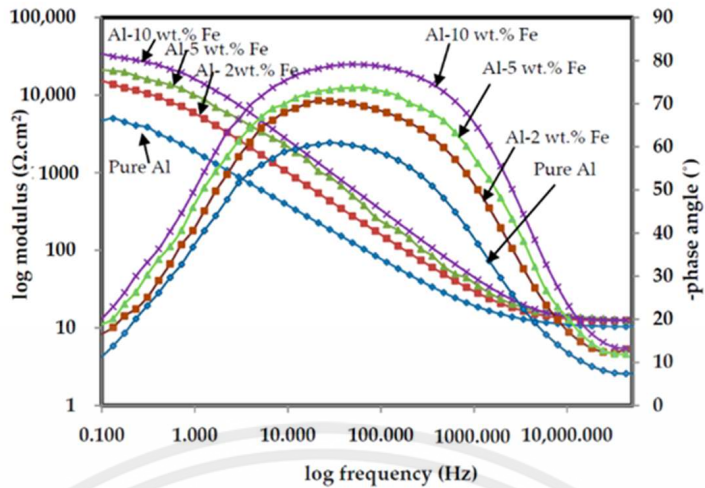
110.75 และ 135.03 ตามลำดับ เมื่อทำการเติม 10 wt.%Fe ใน Al ซึ่งมีความแข็งเพิ่มขึ้นมากกว่า 200% ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้น เนื่องจากอิทธิพลการปรับแต่งขนาดเกรน ซึ่งขนาดผลึกจะลดลงหลังจากการเติม Fe ใน Al ความแข็งของสารประกอบระหว่างโลหะโดยเฉพาะ  $Al_6Fe$  มีค่ามากกว่าความแข็งโลหะหรืออลูมิเนียมผสมบริสุทธิ์ โดยความแข็งของอลูมิเนียมผสมสัมพันธ์กับเศษส่วนของปริมาตร ระหว่างโลหะที่คำนวณด้วย XRD โดยที่อลูมิเนียมผสม Al-10 wt.%Fe ประกอบด้วย Al Fe 2.32% และ Al Fe 15.90% มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มขึ้นของความแข็ง



รูปที่ 2.10 ความแข็งของอลูมิเนียมผสม Al และ Al-Fe [12]

### 2.3.1.2 สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

จากงานวิจัย Asiful H. Seikh และคณะ [12] ตรวจสอบความต้านทานการกัดกร่อน อลูมิเนียมผสม Al และ Al-Fe ด้วย Electrochemical Measurements โดยการแช่ในน้ำเกลือ ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.11 จากรูปสังเกตได้ชัดว่าอิมพีแดนซ์รวมค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Fe เพิ่มขึ้นจาก 2% โดยน้ำหนัก เป็น 10% โดยน้ำหนัก ที่ 0.1 Hz. เนื่องจากปริมาณ Fe เพิ่มขึ้น 10% โดยน้ำหนัก จึงสามารถสรุปได้ว่า Al-10 wt.%Fe มีค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด ทนการกัดกร่อน ได้ดีที่สุด เกิดการก่อตัวของฟิล์ม แบบพาสซีฟ (Passive) โดยเกิดขึ้นฟิล์มบางๆที่มีความเสถียรปกคลุมพื้นผิวของ อลูมิเนียมผสม Al-Fe และ Al บริสุทธิ์ และจากข้อมูล Electrochemical Measurements ยืนยันว่า Al-10 wt.%Fe มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุดจากอลูมิเนียมผสมทั้งหมดในสารละลาย NaCl 3.5 wt.%

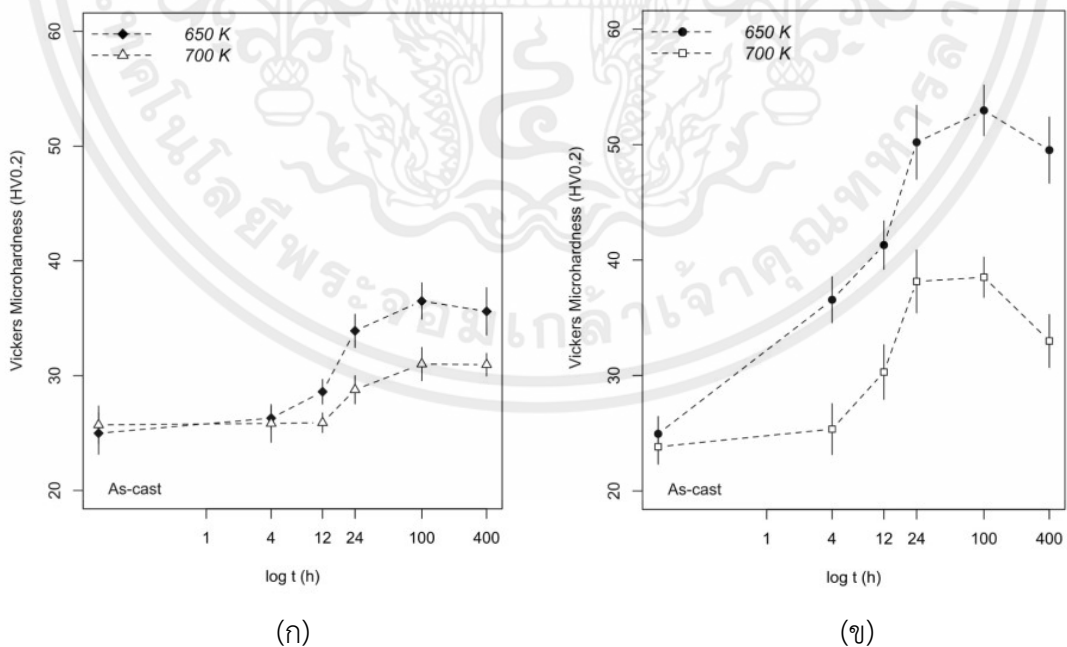


รูปที่ 2.11 แผนภาพโลหะบริสุทธิ์ Al และ Al-Fe แช่ใน NaCl 3.5% เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

### 2.3.2 อิทธิพลของการบ่มแข็ง (Aging Time) ต่อคุณสมบัติทางกล

#### 2.3.2.1 อิทธิพลของธาตุผสมในอลูมิเนียมต่อการบ่มแข็ง

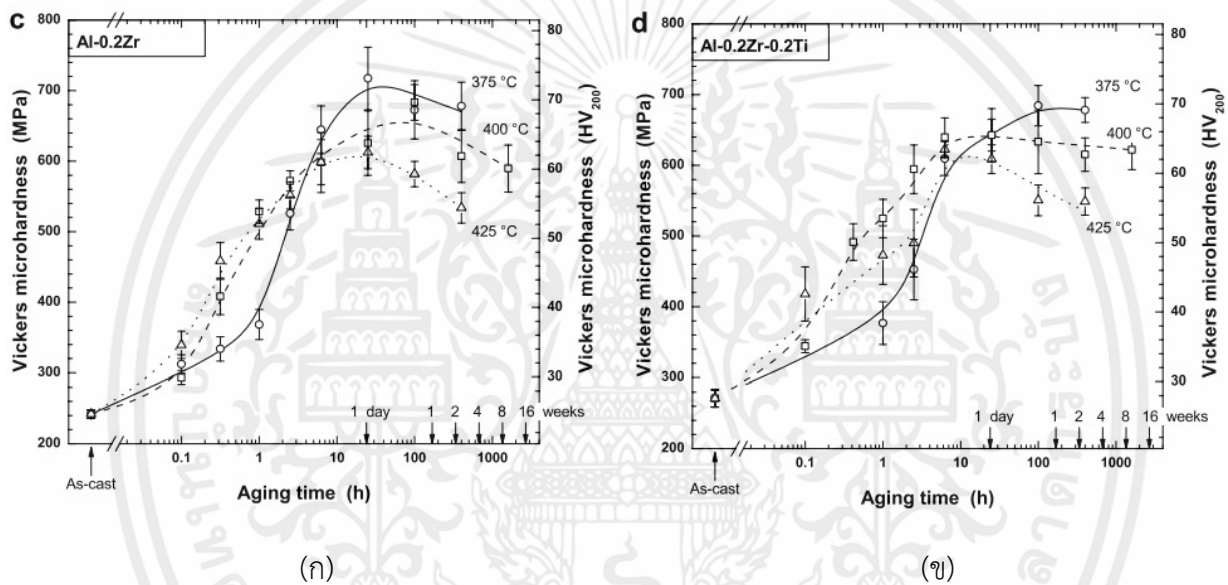
จากงานวิจัย Pedro Henrique Lamarão Souza และคณะ [38] พบว่าเมื่อทำการบ่มแข็ง Al-0.22Zr และ Al-0.32Zr ที่อุณหภูมิ 650 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก)-(ข) เมื่อทำการบ่มเป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง มีค่าความแข็งสูงสุด และหลังจากการบ่ม 400 ชั่วโมง มีค่าความแข็งลดลง โดยอลูมิเนียมผสม Al-0.32Zr มีค่าความแข็งสูงสุด การตกตะกอนและกระจายตัวละเอียดสูงสุด และเกิดกิ่งเดนไดรต์ในปริมาณน้อย เนื่องจากมีปริมาณตัวละลายสูงกว่า Al-0.22Zr



รูปที่ 2.12 อิทธิพลการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 650 และ 700 K (ก) Al-0.22Zr และ (ข) Al-0.32Zr

### 2.3.2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการบ่มแข็ง (Aging Temperature)

จากงานวิจัย Keith E. Knipling และคณะ [39] การเปรียบเทียบรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) ความแข็งที่มีนัยสำคัญระหว่างโลหะผสม Al-Zr และ Al-Zr-Ti สำหรับความเข้มข้นของ Zr ที่กำหนด (0.1 หรือ 0.2 wt.%) และอุณหภูมิในการบ่มแข็ง (375, 400 หรือ 425 องศาเซลเซียส) สำหรับโลหะผสมที่ตรวจสอบ ความแข็งสูงสุดจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการลดสัดส่วนของปริมาณเฟสที่จัดกระจายกับอุณหภูมิของความสามารถในการละลายของ ของแข็งตัวถูกละลายมีการลดลงอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในความแข็งที่อุณหภูมิในการบ่ม 400 ถึง 425 องศาเซลเซียส ในโลหะผสมมี 0.1 wt.%Zr (รูปที่ 2.13 (ก) และ (ข))



รูปที่ 2.13 (ก) อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มแข็งในอลูมิเนียมผสม Al-0.2Zr และ

(ข) อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มแข็งในอลูมิเนียมผสม Al-0.2Zr-0.2Ti

### 2.3.2.3 อิทธิพลของระยะเวลาต่อการบ่มแข็ง (Aging Time)

จากงานวิจัยของ Yuan Liang [40] พบว่า ความแข็งสูงสุดของการบ่มที่เหมาะสมที่ 180 องศาเซลเซียส ของ AA6082 เวลาการบ่มที่เหมาะสมคือ 7 ชั่วโมง และความแข็งสูงสุดคือ 106 HV เมื่อความเครียดอยู่ระหว่าง 5% ถึง 10% เวลาในการบ่มที่เหมาะสมที่สุดจะลดลงเหลือ 6 ชั่วโมง และความแข็งสูงสุดคือ 105 HV หากความเครียดอยู่ในช่วง 10% ถึง 25% ความแข็งสูงสุดของ 104 HV ต้องใช้เวลา 4 ชั่วโมงจึงจะถึง เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นเป็นมากกว่า 25% ระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมจะลดลงเหลือ 3 ชั่วโมง โดยมีความแข็งเท่ากันเพียง 102 HV

## 2.4 การวิเคราะห์ต่างๆ

### 2.4.1 Optical Microscope (OM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบแสงรูปแบบหนึ่ง แสงเป็นตัวช่วยในการทำมองเห็นภาพซึ่งแสงวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆและมีการส่องไปยังวัตถุ ก่อนที่แสงจะมีการส่องผ่านเข้าสู่สายตาเราซึ่งแสงที่อยู่ในระบบสะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเราจะทำให้เราเห็นภาพได้ โดยการมองผ่านเลนส์ Eyepiece ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 [20]



รูปที่ 2.14 กล้อง Optical Microscope (OM)

### 2.4.2 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive Analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัว ของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่างๆ

#### 2.4.2.1 หลักการทำงานของเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

เทคนิคในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองศาที่เกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง สามารถศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็นและความร้อน สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะทดสอบที่เปลี่ยนไปได้ [21]



รูปที่ 2.15 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

#### 2.4.2.2 ประโยชน์ของ XRD เพื่อการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุและผลิตภัณฑ์

เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุและผลิตภัณฑ์อย่างแพร่หลายตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์แร่ เมื่อวิเคราะห์ด้วย XRD สามารถแยกธาตุ และองค์ประกอบภายในแต่ละชนิดภายในได้ เช่น การศึกษาสมบัติเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ของแร่ตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องประกอบด้วยชนิดพาหะประจุ สัมประสิทธิ์เซเบค สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพนำความร้อน ชนิดพาหะประจุและสัมประสิทธิ์เซเบควัดโดยใช้วิธีชั่วคราว สภาพต้านทานไฟฟ้าวัดโดยวิธีสี่ขั้วจุด สภาพนำความร้อนหาได้จากเทคนิคสถานะคงตัว ผลการวิเคราะห์จาก XRD พบเฟสของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{P}_2\text{O}_5$  จากการวัดสมบัติเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ของ  $\text{BaO-K}_2\text{O-SiO}_2\text{-CaO-P}_2\text{O}_5$  พบว่าเป็นชนิดเอ็น สัมประสิทธิ์เซเบคมีค่าเท่ากับ  $61.90 \pm 2.60 \mu\text{V/K}$  สภาพต้านทานไฟฟ้ามูลค่าลดลงกับการเพิ่มกำลังไฟฟ้าและ อุณหภูมิ สภาพนำความร้อนมีค่าเท่ากับ  $215.56 \pm 33.43 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  [41]

#### 2.4.2.3 ประโยชน์ของ XRD เพื่อคำนวณพิกัดภาษีขาเข้า

เทคนิค XRD นำมาใช้เพื่อการทดสอบผลิตภัณฑ์เพื่อคำนวณพิกัดภาษีสินค้านำเข้า ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ประเภทเซรามิกและแก้ว ตามข้อตกลง ASEAN-China FTA เช่น เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารประเภทเซรามิกที่ไม่ใช่ชนิดพอร์ซเลนหรือไชน่า จะถูกพิกัดภาษีขาเข้าร้อยละ 30 ในขณะที่สินค้านำเข้าที่เป็น

เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารประเภทแก้วจะได้รับการยกเว้นภาษีขาเข้าในปัจจุบันเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารบางชนิด จำแนกด้วยสายตาได้ยากกว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากเซรามิก หรือแก้ว จึงมีความจำเป็นต้องใช้เทคนิค XRD ในการตรวจสอบ หากผลิตภัณฑ์นั้น เป็นเซรามิก เมื่อลำแสง X-Ray ตกกระทบจะเกิดการกระเจิงและหักเหของ ลำรังสีเกิดเป็น peak ที่องศาต่างๆ ตามลักษณะโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง แต่หากผลิตภัณฑ์เป็นชนิดแก้ว จะไม่เกิดเป็น peak เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุที่ไม่มีโครงสร้างแบบผลึก

### 2.4.3 เทคนิค Scanning Election Microscope (SEM)

เป็นเทคนิคการศึกษาวัสดุโดยใช้การกวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัสดุนั้น แล้วนำสัญญาณที่ได้ เช่น สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิและสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับไปสร้างเป็นภาพ โดยภาพที่ได้จากกล้อง SEM เป็นภาพที่กำลังขยายสูง และสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ถึง 100 นาโนเมตร และมีลักษณะเหมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน [22]



รูปที่ 2.16 เครื่อง Scanning Election Microscope (SEM)

#### 2.4.3.1 หลักการทำงานของ Scanning Election Microscope (SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนการเกิดภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM เป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐาน และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดิ่ง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างเพิ่มเติม

### 2.4.3.2 ความสามารถในการวิเคราะห์ของ Scanning Election Microscope (SEM)

การวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค Scanning Election Microscope (SEM) สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้ ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่างของวัสดุ, โครงสร้างจุลภาค ขอบเกรน และการกระจายของเฟส, วิเคราะห์ลักษณะชั้นเคลือบ, ศึกษาลักษณะที่เปลี่ยนไปของวัสดุเมื่อผ่านการใช้งาน, วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี, การจัดเรียงตัวของผลึก และความเข้ากันได้ของเนื้อวัสดุ

## 2.5 การทดสอบสมบัติทางกล

สมบัติทางกล (Mechanical Properties) เป็นสมบัติในการพิจารณาการเลือกใช้วัสดุ เนื่องจากเป็นสมบัติที่ส่งผลให้วัสดุเกิดปฏิกิริยาต่างๆขึ้น เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ ทำให้เกิดผลต่างๆของวัสดุ เช่น ความเค้น หรือความเครียด เป็นต้น โดยสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความยืดหยุ่น ความเหนียว เป็นต้น ดังนั้นสมบัติทางกลของวัสดุจึงมีความสำคัญมากสำหรับการเลือกใช้วัสดุเพื่อนำไปใช้งานให้เหมาะสม กับประเภทของการใช้งานที่เหมาะสม สมบัติทางกลที่สำคัญมีดังนี้

### 2.5.1 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งหมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จากการถูกกระทำโดยวัสดุอื่นที่มีความแข็งกว่า โดยวิธีการกด กระทบ หรือขีดข่วน โดยวิธีในการทดสอบความแข็งมีหลายวิธีตามจุดประสงค์ในการทดสอบที่แตกต่างกันออกไป การทดสอบความแข็งมักนิยมทดสอบกับวัสดุที่มีความเป็นโลหะ ซึ่งจากการทดสอบความแข็งให้ผลที่เป็นประโยชน์ดังนี้

1. ใช้ในการแบ่งเกรดวัสดุตามค่าความแข็งที่มีความคล้ายคลึงกัน โดยการกำหนดค่าความแข็งเฉพาะ
2. ใช้เพื่อเป็นมาตรฐานในการตรวจสอบหรือควบคุมวัสดุ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการของการผลิต เช่น การอบชุบแข็ง การเปลี่ยนส่วนผสม
3. ใช้ในการกำหนดค่าของแรงดึงสูงสุดโดยประมาณอย่างรวดเร็ว จากค่าความแข็งของบริเนลล์ที่มีความสัมพันธ์กับค่าแรงดึงสูงสุดของวัสดุนั้นๆ

$$U.T.S = 0.35 \text{ HB (เหล็กกล้า)}$$

$$U.T.S = 0.21 \text{ HB}$$

$$U.T.S = 0.22 \text{ HB}$$

$$U.T.S = 0.23 \text{ HB}$$

$$U.T.S = \text{HB}/4 - 1 \text{ HB}$$

$$U.T.S = \text{ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด}$$

$$\text{HB} = \text{ค่าความแข็งบริเนลล์}$$

### 2.5.1.1 การทดสอบความแข็งโดยการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Permanent Indentation)

เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐานให้ผลการทดสอบที่แม่นยำและสามารถระบุค่าความแข็งได้ โดยการทดสอบจะใช้หลักการกดลงบนผิวของวัสดุให้เกิดรอยบุ๋มถาวร และวัดความแข็งจากขนาดรอยบุ๋มหรือความโตของรอยบุ๋ม หากวัสดุเป็นวัสดุอ่อนรอยบุ๋มมีขนาดใหญ่ และหากวัสดุเป็นวัสดุแข็งรอยบุ๋มจะมีขนาดเล็ก จากหลักการดังกล่าวนำไปสู่การสร้างเครื่องทดสอบมาตรฐาน และวิธีการทดสอบมาตรฐานดังนี้

#### 1) เครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

ใช้หลักการออกแรงกดผ่านหัวกดรูปทรงกลม (Brinell Indenter) ด้วยแรงที่กำหนด ผลที่ได้จะเป็นผลการของแรงกดหน่วย กิโลกรัมแรง (kgf.) พื้นที่ผิวมีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร ( $\text{mm}^2$ ) โดยหัวกดที่ใช้เป็นเหล็กกล้าชุบแข็งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และมีความแข็ง 850-1500 HB สามารถวัดค่าความแข็งได้ไม่เกิน 300-650 HB



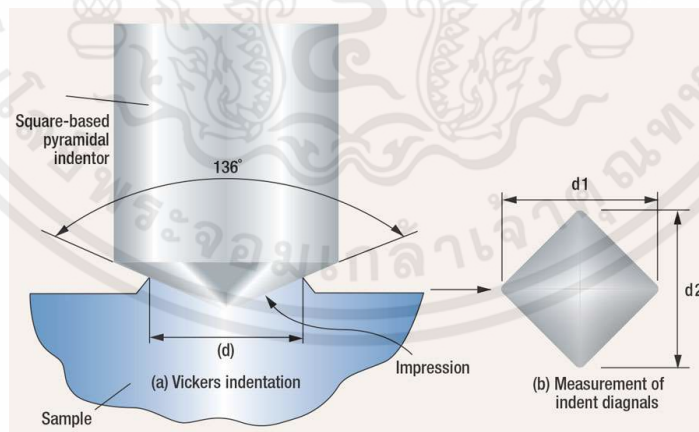
รูปที่ 2.17 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

$$Bhn = \frac{P}{0.5\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad : \text{หน่วย } kg/mm^2 \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- P = น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม
  - D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววงกลม ในหน่วยมิลลิเมตร
  - d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดบนผิวชิ้นงานทดสอบ ในหน่วยมิลลิเมตร
  - t = ขนาดระยะลึกจากรอยกดจากผิวหน้าลงไป ในหน่วยมิลลิเมตร

## 2) เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศา ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 kgf. โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d1 และ d2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มม. ดังรูป สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่มีความนิ่มมากจนถึงโลหะที่มีความแข็งมากๆ (VHN 1500) โดยที่ไม่มีความจำเป็นต้องเปลี่ยนหัวกด โดยการทดสอบความแข็งด้วยวิกเกอร์มีข้อได้เปรียบกับการทดสอบความแข็งด้วยบริเนลล์ คือไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนของ  $P/D^2$  และข้อจำกัดของความหนาของชิ้นงานทดสอบ ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปเพื่อคำนวณค่าความแข็ง [24] ดังนี้



รูปที่ 2.18 การทดสอบความแข็งด้วยวิกเกอร์

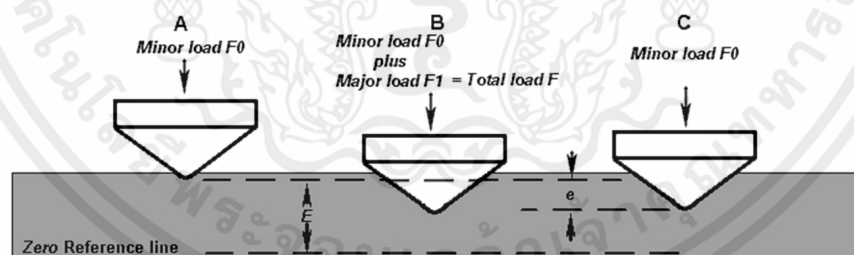
$$HV = \frac{2P \sin(136^\circ/2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad : \text{หน่วย } kg/mm^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $P$  = น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม

$d$  = ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในหน่วยมิลลิเมตร

### 3) เครื่องทดสอบความแข็งร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test)

การวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือลูกบอล เหล็กกล้า ที่มีขนาด 1.6-12.7 มิลลิเมตร (1/16 – 1/2 นิ้ว) และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำ คำนึง (minor load) เพื่อใช้ในการกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก ซึ่งการวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วยการทดสอบจากการใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ ร็อกเวลล์ซี (Rockwell – C) , ร็อกเวลล์บี (Rockwell – B) และร็อกเวลล์เอ (Rockwell – A) ซึ่งในการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ซีใช้หัวกดแบบเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120 องศา ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf. กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) 140 kgf. ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะสามารถคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงแรงกดนำ ซึ่งปลายหัวกดความแข็งจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ [25] ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การทดสอบความแข็งด้วยร็อกเวลล์

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบความแข็ง

Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Vickers hardness HV [F ≥ 98 N]	Brinell hardness <sup>1)</sup> HB	Rockwell hardness		
			HRB	HRC	HRA
255	80	76	-	-	-
270	85	80.7	41	-	-
285	90	85.5	48	-	-
305	95	90.2	52	-	-
320	100	95	56.2	-	-
335	105	99.8	-	-	-
350	110	105	62.3	-	-
370	115	109	-	-	-
385	120	114	66.7	-	-
400	125	119	-	-	-
415	130	124	71.2	-	-
430	135	128	-	-	-
450	140	133	75	-	-
465	145	138	-	-	-
480	150	143	78.7	-	-
495	155	147	-	-	-
510	160	152	81.7	-	-
530	165	156	-	-	-
545	170	162	85	-	-
560	175	166	-	-	-
575	180	171	87.1	-	-
595	185	176	-	-	-
610	190	181	89.5	-	-
625	195	185	-	-	-
640	200	190	91.5	-	-
660	205	195	92.5	-	-
675	210	199	93.5	-	-
690	215	204	94	-	-
705	220	209	95	-	-
720	225	214	96	-	-
740	230	219	96.7	-	-
755	235	223	-	-	-
770	240	228	98.1	20.3	60.7
785	245	233	-	21.3	61.2
800	250	238	99.5	22.2	61.6
820	255	242	(101)	23.1	62
835	260	247	-	24	62.4
850	265	252	(102)	24.8	62.7
865	270	257	-	25.6	63.1
880	275	261	(104)	26.4	63.5
900	280	266	-	27.1	63.8
915	285	271	(105)	27.8	64.2
930	290	276	-	28.5	64.5
950	295	280	-	29.2	64.8
965	300	285	-	29.8	65.2
995	310	295	-	31	65.8
1030	320	304	-	32.2	66.4
1060	330	314	-	33.3	67
1095	340	323	-	34.3	67.6
1125	350	333	-	35.5	68.1
1155	360	342	-	36.6	68.7
1190	370	352	-	37.7	69.2
1220	380	361	-	38.8	69.8
1255	390	371	-	39.8	70.3
1290	400	380	-	40.8	70.8
1320	410	390	-	41.8	71.4
1350	420	399	-	42.7	71.8
1385	430	409	-	43.6	72.3
1420	440	418	-	44.5	72.8
1455	450	428	-	45.3	73.3
1485	460	437	-	46.1	73.6
1520	470	447	-	46.9	74.1
1555	480	(465)	-	47.7	74.5
1595	490	(466)	-	48.4	74.9
1630	500	(475)	-	49.1	75.3
1665	510	(485)	-	49.8	75.7
1700	520	(494)	-	50.5	76.1
1740	530	(504)	-	51.1	76.4
1775	540	(513)	-	51.7	76.7
1810	550	(523)	-	52.3	77
1845	560	(532)	-	53	77.4
1880	570	(542)	-	53.6	77.8
1920	580	(551)	-	54.1	78
1955	590	(561)	-	54.7	78.4
1995	600	(570)	-	55.2	78.6
2030	610	(580)	-	55.7	78.9
2070	620	(589)	-	56.3	79.2
2105	630	(599)	-	56.8	79.5
2145	640	(608)	-	57.3	79.8
2180	650	(618)	-	57.8	80
-	660	-	-	58.3	80.3
-	670	-	-	58.8	80.6
-	680	-	-	59.2	80.8
-	690	-	-	59.7	81.1
-	700	-	-	60.1	81.3
-	720	-	-	61	81.8
-	740	-	-	61.8	82.2
-	760	-	-	62.5	82.6
-	780	-	-	63.3	83
-	800	-	-	64	83.4
-	820	-	-	64.7	83.8
-	840	-	-	65.3	84.1
-	860	-	-	65.9	84.4
-	880	-	-	66.4	84.7
-	900	-	-	67	85
-	920	-	-	67.5	85.3
-	940	-	-	68	85.6

The figures in brackets represent hardness values beyond the defined scope of the standardised hardness test but which are frequently used as approximate values in practice. Furthermore the Brinell hardness values in brackets are only valid if the test was carried out with a hard metal ball.

<sup>1)</sup> Calculated with: HB = 0.95 · HV

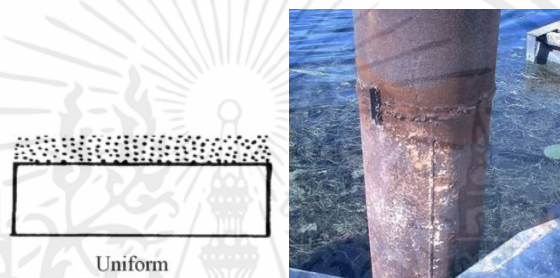
### 2.5.2 การกัดกร่อนของวัสดุ (Corrosion)

การกัดกร่อนของวัสดุ หมายถึงภาวะซึ่งวัตถุหรือสิ่งประดิษฐ์ทางด้านวิศวกรรมทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัตถุนั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานหรือวัตถุประสงค์การใช้งานลดลงในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปสาเหตุการกัดกร่อนเกิดได้หลายอย่างเช่น ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีหรือเกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพของวัตถุหรือลักษณะการกัดกร่อน โดยประเภทของการกัดกร่อนมีดังนี้ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม โดยมีอัตราความสูญเสียพื้นผิวของวัสดุที่บริเวณที่สัมผัสปัจจัยให้เกิดการกัดกร่อนต่างๆ โดยเฉลี่ยจะใกล้เคียงกัน ซึ่งการกัดกร่อนแบบนี้เห็นอยู่ทั่วไป โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวของโลหะนั้น โดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่าง สม่ำเสมอบนผิวหรือเป็นบริเวณกว้าง มีผลให้โลหะบางลง หรือมีน้ำหนักหายไป คือ เบาลงเรื่อยๆ การกัดกร่อนประเภทนี้ในแง่ของเทคนิคไม่ค่อยเป็นปัญหาและไม่ก่อให้เกิดอันตรายรุนแรงเท่าใดนัก เนื่องจากสามารถหาอัตราการกัดกร่อนและออกแบบเพื่อ พร้อมทั้งทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้



รูปที่ 2.20 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

## 2. การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion)

โลหะแต่ละชนิดมีค่าศักย์เฉพาะตัว ดังนั้นหากมีโลหะ 2 ชนิด สัมผัสกันอยู่และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และส่วนโลหะเชื่อมต่อกันที่สามารถนำไฟฟ้าหรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมี เมื่อเวลาผ่านไป โลหะที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน (แอโนด) เกิดขึ้น ขณะที่โลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะไม่กัดกร่อน (แคโทด) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสอง ยิ่งมากเท่าไรจะส่งผลให้ความรุนแรงมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.21 การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์

### 3. การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion)

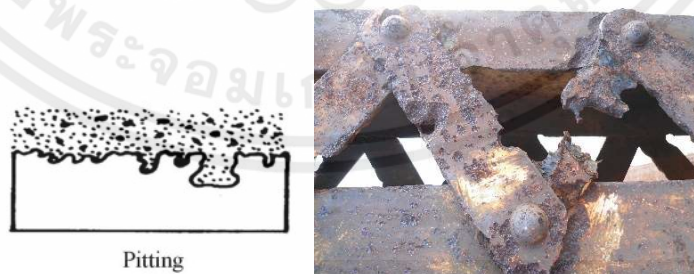
เกิดจากวัสดุสัมผัสสารละลาย บางชนิดที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า หรือเกิดจากบริเวณพื้นผิวที่การถ่ายเทของเหลวไม่ดี ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแตกต่างกัน มักเกิดตามรอยแยกหรือตามซอกต่างๆ ของวัตถุ และการสัมผัสระหว่างผิวของโลหะและผิวที่ไม่ใช่โลหะ สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่อับได้เช่นกัน



รูปที่ 2.22 การกัดกร่อนแบบช่องแคบ

### 4. การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting Corrosion)

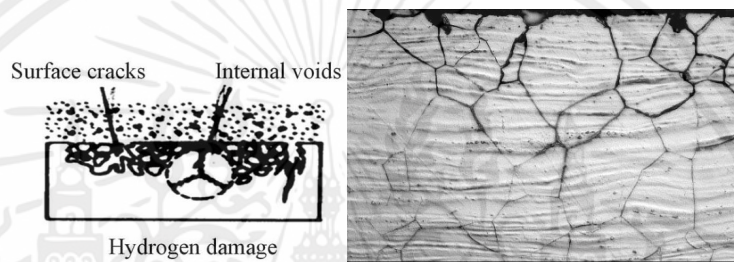
เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโลหะที่ได้พัฒนาเป็นฟิล์ม เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ จะเกิดการกัดกร่อนลึกเข้าไป และส่วนมากนั้น เกิดจากวัสดุที่สัมผัสกับสารละลายจำพวกคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เมื่อวัตถุถูกกัดกร่อน บริเวณกัดกร่อนจะเป็นรูหรือหลุม อาจถูกบดบังด้วยตัวกัดกร่อนเอง ส่วนมากจะเกิดแบบเฉียบพลันตรวจพบได้ยาก มีขนาดเล็ก ส่วนใหญ่พบในวัสดุโลหะที่สามารถสร้างชั้นป้องกันโดยการกัดกร่อนแบบหลุมนั้นก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือ ชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมดที่น้อย



รูปที่ 2.23 การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม

## 5. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

เกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิม ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ โดยเหล็กจะสูญเสียโครเมียมในรูปคาร์ไบด์เมื่อเกิดการสูญเสียจะขาดโครเมียมในการสร้างการป้องกันเนื้อเหล็ก โดยปกติแล้วขอบเกรนมักจะเกิด ปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรนอยู่แล้ว โดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วแอโนด (สูญเสียเนื้อโลหะ) ภายในเกรนนั้นมักจะแสดงตัวเป็นขั้วแคโทดหากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นที่ที่แสดงตัวเป็นแอโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนจะเกิดการกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบ Uniform Attack กัดเซาะทั้งก้อน บริเวณที่เป็นแอโนด แคโทด จะเปลี่ยนตลอดเวลา



รูปที่ 2.24 การกัดกร่อนตามขอบเกรน

## 6. การผุกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching)

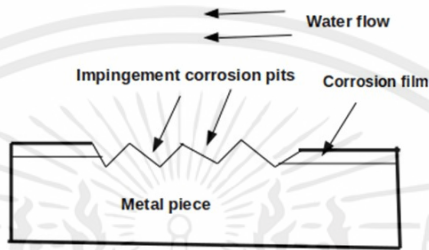
มักเกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมผสม ที่ธาตุโลหะชนิดหนึ่งเสถียรกว่าธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อม เช่น การกัดกร่อนของทองเหลือง (Dezincification) โดยทองเหลืองจะสูญเสียสังกะสี เหลือแต่ทองแดงทำให้เป็นรูพรุน รูปทรงของวัตถุจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่ความแข็งแรงจะลดลง สามารถลดการกัดกร่อนได้โดยเติมดีบุกลงไปประมาณร้อยละ 1 ในทองเหลือง



รูปที่ 2.25 การผุกร่อนแบบเลือก

## 7. การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion)

เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่ เช่น การไหลหรือเคลื่อนที่ของสารละลายหรือของเหลวที่มีผลต่อการกัดกร่อน ไหลผ่านโลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง หากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกหรอทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้นหากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวได้ การไหลของของไหลอาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็ว การกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่หากฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้าก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรง และรวดเร็ว



รูปที่ 2.26 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ

## 8. การกัดกร่อนโดยความเค้น (Stress Corrosion)

เกิดจากความเค้นหรือแรงเค้นของสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นโดยรอบ เช่น การตัด, การดัด, ความร้อนภายนอก, การสั่นสะเทือน หรือความเค้นจากภายในของวัตถุที่หลงเหลือจากการขึ้นรูป การเย็นตัวไม่สม่ำเสมอของวัตถุ ความเค้นอาจเป็นความเค้นตึงหรือความเค้นภายนอกที่มากกระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อนหรือไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวอยู่มาก ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่อไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้อง จะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้



รูปที่ 2.27 การกัดกร่อนโดยความเค้น

### 2.5.2.1 การทดสอบการกัดกร่อนของวัสดุ

การทดสอบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุ เป็นหนึ่งในความรับผิดชอบที่สำคัญที่สุดของวิศวกร เนื่องจากในความเป็นจริง หากไม่มีการประเมิน การบรรเทาหรือการจัดการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมใดๆ แทบจะเป็นไปไม่ได้เลย มีเหตุผลหลายประการสำหรับการตรวจสอบการกัดกร่อน บางครั้งในกระบวนการคัดเลือกวัสดุ สำหรับการใช้งานทางอุตสาหกรรม จำเป็นจะต้องมีการตรวจประเมินวัสดุประเภทต่างๆ ในสภาพแวดล้อมที่จำเพาะ โดยการตรวจประเมินอลูมิเนียมผสมชนิดใหม่ในสภาพแวดล้อมประเภทต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมผสมเชิงพาณิชย์ทั่วไป การประมาณประสิทธิภาพของสารยับยั้งในการลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะ และการเข้าใจกลไกการสึกกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อนมักจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก: การทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนาม ซึ่งแต่ละการทดสอบมีข้อดีและข้อเสีย ตัวอย่างเช่น สภาพแวดล้อมที่มีอยู่ในการใช้งานจริงจะแตกต่างจากสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะคาดการณ์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการให้เข้ากับการสภาพแวดล้อมเดียวกับอุตสาหกรรม ในทางกลับกันการทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีความเป็นไปได้ที่จะเร่งการกัดกร่อนของสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่เป็นไปไม่ได้ ในการทดสอบภาคสนาม โดยวิธีการทดสอบมีหลายประเภทดังนี้ [27]

#### 1. Immersion Testing

พบมากที่สุดและเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการทดสอบ ในการทดสอบประเภทนี้ ซึ่งมีการชี้แจงขั้นตอนโดย ASTM และ NACE น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่แห้งจะถูกวัดโดยเครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ก่อนและหลังสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ก่อนและหลังการชั่งน้ำหนักตัวอย่างมีการเตรียมความพร้อม โดยเฉพาะ ควรที่จะดำเนินการกับชิ้นงานทดสอบที่เกิดการกัดกร่อนหรืออินทรีย์สารปนเปื้อน ความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่างจะคำนวณโดยทั่วไปเป็นอัตราการกัดกร่อนในแง่ของการสูญเสียน้ำหนักหรือการสูญเสียความหนาในหน่วย mils (0.001 นิ้ว) ต่อปี (mpy) หรือมิลลิเมตรต่อปี (mm/yr) ผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับประเภทของโลหะ (น้ำหนักจำเพาะ) ที่ทำการทดสอบ พื้นที่ผิวสัมผัส และปัจจัยระยะเวลาการทดสอบ

#### 2. Visual Examination

เป็นการตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อประเมินการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น การเกิดรูพรุนหรือจากการขีดผิว และนอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบออปติคัลหรือแบบสแกน การวิเคราะห์องค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น เอ็กซ์เรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX), การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD), และเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุนาโนโดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์ ในการประเมินพื้นผิวที่สึกกร่อนและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้แม่นยำยิ่งขึ้น

### 3. Salt Spray / Fog Testing

การทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของโลหะในการเกิดสนิม ซึ่งวิธีการทดสอบใช้เครื่องทดสอบการกัดกร่อนไอเกลือ (Salt Spray Test Chamber) บางครั้งอาจถูกเรียกว่า เครื่องทดสอบหมอกเกลือ (Salt Fog Test Chamber) หรือเครื่องทดสอบละอองเกลือ (Salt Spray Tester) ซึ่งทั้งหมดหมอดนี้คือเครื่องแบบเดียวกัน การทดสอบการกัดกร่อนของไอเกลือจะถูกอ้างอิงตามมาตรฐานนานาชาติ เช่น ASTM B117, ISO 9227, JIS Z2371 เป็นต้น

โดยวิธีทดสอบโดยวางชิ้นงานทดสอบลงในตู้ทดสอบที่ ควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (NSS) หรือ 50 องศาเซลเซียส (CASS) จากนั้นทำการพ่นหมอกเกลือภายในตู้ทดสอบ ให้ปริมาณหมอกเกลือมีค่าระหว่าง 1-2ml/80sq.mm/hour ทำการวัดโดยกรวย (Funnel) การผสมน้ำเกลือมีสัดส่วน ดังนี้ น้ำดีไอ 95% และเกลือ 5% โดยน้ำหนัก สำหรับสเปกเกลือที่ใช้ได้ถูกกล่าวในมาตรฐาน ASTM B117

### 4. The Weathering Testing

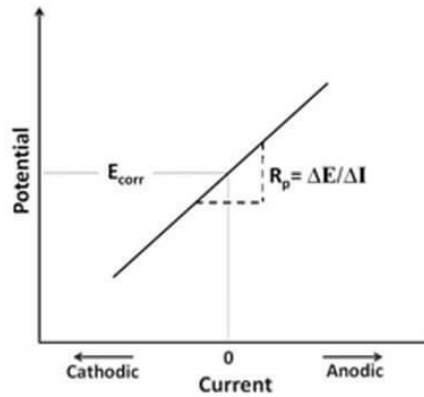
เป็นอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่าการทดสอบสภาพดินฟ้าอากาศเพื่อตรวจสอบความทนทานของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเล็ตและวงจรความร้อนและการกัดกร่อน

### 5. Electrochemical Testing

เป็นวิธีการเคราะห์การกัดกร่อนโดยการควบคุมปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี โดยสามขั้วไฟฟ้าที่มักใช้รวมถึง ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode), ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) และขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter (auxiliary) Electrode), ศักยภาพ, กระแส และเวลาเป็นปัจจัยสำคัญสามประการในการทดสอบไฟฟ้าเคมี โดยการทดสอบการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าเคมีมีหลายประเภท แต่ละประเภทใช้เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ

#### 5.1 ความต้านทานการโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization Resistance, LPR)

เป็นการทดสอบการกัดกร่อนของไฟฟ้าเคมีที่ง่ายที่สุดคือความต้านทานการโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งกระแสไฟฟ้าจะถูกวัดเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สแกนในช่วงแคบ (~20 mV) จากค่าต่ำไปสูงกว่าค่าศักย์ภาพของการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ความชันของกระแสเทียบกับเส้นโค้งศักย์แสดงความต้านทานของโพลาไรซ์ ซึ่งสัมพันธ์ผกผันกับอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 2.28 แสดงเส้นโค้งของ LPR ความชันของเส้นแสดงความต้านทานโพลาไรซ์ ( $R_p$ )

## 5.2 การทดสอบโพลาไรเซชันแบบโพเทนชิโอดนามิก (Potentiodynamic Polarization Tests)

เป็นการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกเพิ่มขึ้นเพื่อเร่งการกัดกร่อน หากเกิดการกัดกร่อนของรูเล็กกระแสจะเพิ่มขึ้น โดยเทคนิคนี้จะแสดงผลเป็นเส้นกราฟ polarization ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจากเทคนิคนี้คือ พฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุ โดยพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) ดังรูปที่ 2.31 และคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน [28] จากสมการ (2.5)

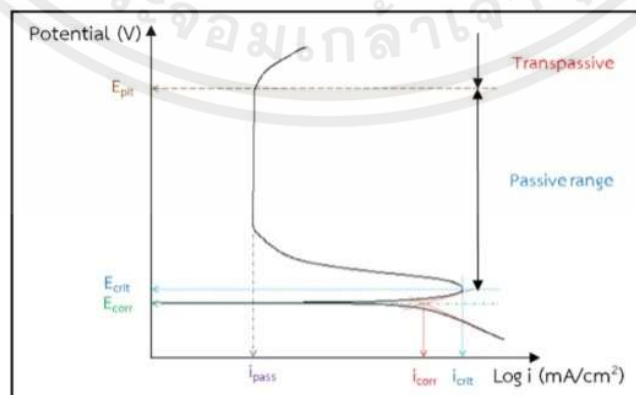
$$C.R. (mmpy) = \frac{0.13 \times I_{corr} \times EW}{d} \quad (2.5)$$

เมื่อ C.R. = อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)

$I_{corr}$  = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวโลหะตัวอย่าง (มิลลิแอมแปร์/ซม<sup>2</sup>)

E.W. = มวลสมมูลของโลหะตัวอย่าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ มวลอะตอม/ประจุ (หรือ n)

d = ค่าความหนาแน่นของโลหะ (กรัม/ซม<sup>2</sup>)



รูปที่ 2.29 เส้นกราฟ Polarization ที่ได้จากเทคนิค Potentiodynamic Polarization

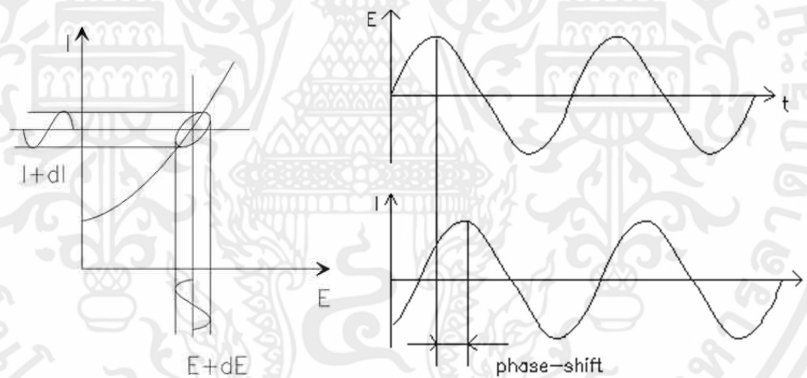
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)

อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบเคมีไฟฟ้าโดยอาจจะช่วยแยกแยะอิทธิพลของลักษณะทางกายภาพและปรากฏการณ์ทางเคมีที่ศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งในการทำงาน ด้วยการทดลองเพียงขั้นตอนเดียวก็ได้รับรวบรวมช่วงความถี่ที่ใช้งานไว้อย่างเพียงพอ

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ EIS ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในด้านวัสดุศาสตร์โดยมักใช้ในการศึกษา ลักษณะการเคลือบแบบเตอเรีย, เซลล์เชื้อเพลิงและการกัดกร่อน อีกทั้งได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง ในการวิเคราะห์การแพร่ของไอออนผ่านเยื่อและการศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

หลักการของวิธีการวัดโดยใช้อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้ามีหลักการคล้ายกับวิธีวัดอิมพีแดนซ์ทั่วไป ซึ่งจะให้สัญญาณกระตุ้นในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดต่างไปยังระบบ ภายใต้การวิเคราะห์และการวัดการตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ ที่สนใจ จากรูปที่ 2.29 จะแสดง กราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้า - ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎีโดยที่  $I_0$  คือกระแสไฟฟ้า กระแสตรง  $E_0$  คือศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม  $t$  คือเวลา และ  $\phi$  คือการเลื่อนเฟส (Phase Shift)



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี

คลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดต่ำของ  $\Delta E \sin \omega t$  ณ ความถี่ค่าหนึ่ง เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้าไปในค่าศักย์ไฟฟ้า  $E_0$  ส่งผลให้เกิดการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นรูปไซน์ของ  $\Delta I \sin (\omega t + \phi)$  เพิ่มเติมเข้าไปในค่า  $I_0$  การตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าจะเลื่อนไปตามศักย์ไฟฟ้าที่ให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จาก กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการ 2.6

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad (2.6)$$

ค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อนกับขนาดและการเลื่อนเฟส ซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วในระบบเคมีไฟฟ้าจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 0.1 เฮิร์ตซ์ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า  $Z(\omega)$  เป็นปริมาณเชิงซ้อนจึงสามารถแสดงได้ในพิกัดเชิงขั้ว อิมพีแดนซ์ของข้อมูลโดยสามารถเขียนได้ในรูปที่ 2.30

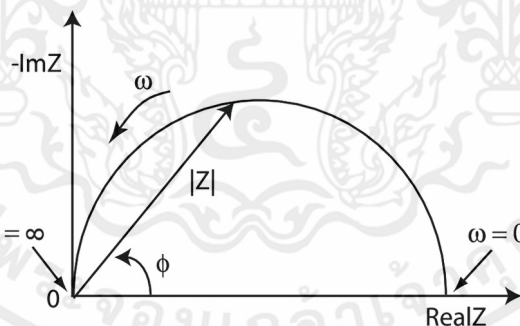
$$Z(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\phi(\omega)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $|Z(\omega)|$  คือขนาดของแอมพีแดนซ์ที่ความถี่  $\omega$  และ  $\phi(\omega)$  คือการเลื่อนเฟสที่ความถี่  $\omega$  ในพิกัดคาร์ทีเซียน อิมพีแดนซ์เขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_j(\omega) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $Z_r(\omega)$  คือส่วนจริง (real part) ของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่  $\omega$  และ  $Z_j(\omega)$  คือส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) ที่ความถี่  $\omega$  และ  $j = \sqrt{-1}$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงและส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เรียกว่า Nyquist plot ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ (Nyquist Plot)

โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าเคมีจะประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (หรือระบบภายใต้การวิเคราะห์) เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) หรือเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Galvanostat) และเครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA) ทั้งนี้เครื่องวิเคราะห์การตอบสนอง ค่าความถี่จะใช้คลื่นรูปไซน์และการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบเพื่อระบุอิมพีแดนซ์ของระบบ เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทดลองอิมพีแดนซ์จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวน 2, 3 หรือ 4 ขั้วเซลล์พื้นฐาน

ที่สุดจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 ขั้ว โดยปกติขั้วไฟฟ้าภายใต้การวิเคราะห์จะเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) และขั้วไฟฟ้าที่ทำให้วงจรไฟฟ้าครบวงจรเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าสมทบ (Counter Electrode) ขั้วไฟฟ้ามักจะจุ่มอยู่ในสารพาประจุที่เป็นของเหลวสำหรับ ระบบของแข็งก็อาจใช้สารพาประจุซึ่งเป็นของแข็ง หรืออาจไม่มีสารพาประจุก็ได้

ในที่นี้จะขอลำถึงโครงสร้างของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุด ขั้วไฟฟ้าชนิดที่สามนี้ คือขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำหนดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานให้มีความแน่นอน เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าสัมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าเดี่ยวไม่สามารถวัดค่าได้ การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเคมี จึงใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นหลักในการทำงาน เพราะฉะนั้นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจึงควรมีความผันกลับ (Reversible) ไปมาได้และศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงควรมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาทำการวัดวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้รับความนิยมน้อยอย่างสูงในการแปลข้อมูลอิมพีแดนซ์ โดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสร้างขึ้นมาจากองค์ประกอบที่เป็นที่รู้จักกันดี เช่น ความต้านทาน ตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น Constant Phase Element อิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์กและอิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน เพื่อให้วงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้องค์ประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

องค์ประกอบของวงจร	อิมพีแดนซ์	การเลื่อนเฟส
ความต้านทาน (Resistance, R)	R	0
ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C)		-90
ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L)		+90
Constant Phase Element, CPE		-
อิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์ก (Warburg Impedance)	$\frac{R}{\sqrt{j\omega}}$	-
อิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ (Tangent Impedance)	$R \frac{\tanh\sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}}$	

ตัวต้านทาน (Resistance, R) อิมพีแดนซ์ของความต้านทานสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.9) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะไม่ขึ้นกับค่าความถี่และไม่มีส่วนจินตภาพ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานจะมีเฟสเดียวกับศักย์ไฟฟ้าเสมอ ตัวอย่างของตัวต้านทานที่ใช้อธิบายระบบเคมีไฟฟ้า ได้แก่

$$Z = R \quad (2.9)$$

- Ohmic Resistance,  $R_{\Omega}$  นั้นคือความต้านทานที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงาน ในบางครั้งอาจแทนด้วย  $R$  นอกจากนี้ค่าความต้านทานนี้ยังขึ้นกับการเหนี่ยวนำของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดอีกด้วย
- Charge Transfer Resistance,  $R_{ct}$  จากการที่ขั้วอิเล็กโทรดมีความเป็นขั้วมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดถูกบังคับให้เลื่อนไปจากศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิด เนื่องมาจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุ (Capacitance,  $C$ ) ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุแสดงได้ดังสมการ (2.10) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะขึ้นกับค่าความถี่และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสเลื่อนเป็น  $-90^\circ$  เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า ตัวอย่างของตัวเก็บประจุที่ใช้อธิบายระบบไฟฟ้าเคมี ได้แก่

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.10)$$

- Double Layer Capacitance,  $C_{dl}$  จากการที่บริเวณ รอยต่อของขั้วอิเล็กโทรด และเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนชั้นประจุเชิงคู่ (double layer) เกิดขึ้น ซึ่งชั้นประจุเชิงคู่นี้จะเปรียบเสมือนที่เก็บประจุจากสารละลายที่จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งประจุเหล่านี้จะแยกออกมาจากประจุที่ขั้วอิเล็กโทรด ค่าตัวเก็บประจุที่ชั้นเชิงคู่นี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆอย่าง ไม่ว่าจะเป็นศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิความหนาแน่นของประจุ ชนิดของประจุและความบริสุทธิ์ของสาร เป็นต้น
- Constant Phase Element, CPE ในการอธิบายของระบบไฟฟ้าเคมีนั้นมักจะใช้ตัวเก็บ
- ประจุอุดมคตินั้นคือสมมติให้ลักษณะของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเดียวกันตลอดทั้งแผ่นซึ่งปกติแล้วจะเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการใช้ CPE อธิบายในส่วนที่ไม่เป็นลักษณะเดียวกันของพื้นผิวดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$Z = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha} \quad (2.11)$$

เมื่อ C คือตัวเก็บประจุอุดมคติและ  $\alpha$  คือค่าคงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 1 โดยค่า  $\alpha = 1$  ตัว CPE จะทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุอุดมคติ

อิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์ก (Warburg Impedance,  $Z_{war}$ ) ค่าอิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์กเป็นอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำ แสดงถึงชั้นการแพร่ที่ไม่จำกัดขอบเขต (Infinite diffusion or Warburg diffusion) ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าดังสมการ (2.12)

$$Z = \frac{1}{\sqrt{j\omega\tau}} \quad (2.12)$$

อิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ (Tangent Impedance) ค่าอิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์เป็นอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำแสดงถึงชั้นการแพร่ที่จำกัดขอบเขต (Finite Diffusion) ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าดังสมการ (2.13)

$$Z = \frac{\tanh\sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $R$  คือความต้านทานในการแพร่  $\delta$  คือความหนาของชั้นการแพร่  
 $\tau$  คือค่าคงที่ของเวลาในการแพร่  $D$  คือค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่  
 ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L) ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำดังสมการ (2.14) โดยค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้นเหมือนตัวเก็บประจุ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเฟสเลื่อนเป็น +90 เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า

$$Z = j\omega L \quad (2.14)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีบางครั้งก็เป็นผลมาจากการดูดซึมของสารตั้งต้นบนพื้นผิว ซึ่งจะสามารถสร้างแบบจำลองโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำแทนได้นั่นเอง นอกจากนี้การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้าการตอบสนองที่ช้าของขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ในกรณีนี้อาจจะสามารถอธิบายถึงผลของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ว่า มีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด [30]

### 2.5.3 การทดสอบสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

การนำไฟฟ้า หมายถึงการที่ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระระหว่างอะตอม โดยวัสดุยอมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเนื้อของวัสดุ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถใช้การอนุมานเกี่ยวกับองค์ประกอบ

โครงสร้างจุลภาคหรือสมบัติเชิงกลของโลหะนั้น ตัวแปรที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความต้านทานของวัสดุ ความยาวของวัสดุนำไฟฟ้า และพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ [30]

### 2.5.3.1 การนำไฟฟ้าในโลหะ

โลหะประกอบด้วยตาข่ายของอะตอมแต่ละชนิดมีเปลือกนอกของอิเล็กตรอนที่ได้อย่างอิสระแยกตัวออกจากอะตอมหลักและการเดินทางของพวกเขาผ่านตาข่าย เรียกอีกอย่างว่าตาข่ายไอออนิกขั้วบวก ซึ่งอิเล็กตรอนที่แยกตัวได้นี้ทำให้โลหะสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า ถูกนำไปใช้กับโลหะสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนลอยไปทางขั้วบวก โดยทั่วไปความเร็วดริฟต์ของอิเล็กตรอนจะมีขนาดเล็ก ตามลำดับของขนาดเมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่น้อยลง แม้ความเร็วดริฟต์ที่ช้าจะส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของกระแส ไฟฟ้ามาก กลไกนี้คล้ายคลึงกับการถ่ายโอนโมเมนตัมของลูกบอลในแท่นวางของนิวตัน โดยมีการแพร่ กระจายอย่างรวดเร็วของพลังงานไฟฟ้าไปตามเส้นลวดนั้นไม่ได้เกิดจากแรงทางกล แต่เป็นการแพร่ กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานเป็นตัวนำทางด้วยลวด

โลหะส่วนใหญ่มีความต้านทานไฟฟ้า ในแบบจำลองที่เรียบง่ายกว่า (แบบจำลองเชิงกลที่ไม่ใช่ควอนตัม) สิ่งนี้สามารถอธิบายได้โดยการแทนที่อิเล็กตรอนและโครงตาข่ายคริสตัล ด้วยโครงสร้างคล้ายคลื่น เมื่อเคลื่อนอิเล็กตรอนเดินทางผ่านตาข่ายคลื่นจะรบกวนซึ่งทำให้เกิดความต้านทาน ยิ่งตาข่ายมีความสม่ำเสมอมากเท่าไรการรบกวนก็ยิ่งน้อยลงและทำให้ความต้านทานน้อยลง จำนวนความต้านทานส่วนใหญ่เกิดจากสองปัจจัย ประการแรกมันเกิดจากอุณหภูมิและปริมาณการสั่นสะเทือนของตาข่ายคริสตัล อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มากขึ้นซึ่งทำหน้าที่เป็นสิ่งผิดปกติในโครงตาข่าย ประการที่สองความบริสุทธิ์ของโลหะมีความเกี่ยวข้องเนื่องจากส่วนผสมของไอออนที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งการนำไฟฟ้าที่ลดลงในการหลอมโลหะบริสุทธิ์เกิดจากการสูญเสียลำดับของผลึกในระยะยาว แต่ลำดับช่วงสั้นยังคงอยู่และความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่ง ระหว่างตำแหน่งของไอออนส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างคลื่นที่หักเหด้วยไอออนที่อยู่ติดกัน [31]

### 2.5.3.2 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวต้านทาน

1. ตัวนำโลหะบริสุทธิ์ เช่น เงิน ทองแดง แพลททินัม ความต้านทานแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) นำความรู้นี้ไปสร้างเทอร์โมมิเตอร์ ชนิดความต้านทาน ตัวนำที่เป็นอโลหะนิยมนิยมผสม จะมีสภาพต้านทานสูงกว่าตัวนำบริสุทธิ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสภาพต้านทานจะเปลี่ยนไปน้อยมาก จึงนิยมนำอโลหะนิยมนิยมผสมไปสร้างตัวต้านทานมาตรฐาน

2. สารกึ่งตัวนำ เช่น เจอร์มาเนียม ซิลิกอน แกรไฟต์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วดังนั้นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ประเภท สารกึ่งตัวนำประกอบในวงจรจึงทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด

3. ฉนวน เป็นวัสดุที่มีสภาพต้านทานสูงมาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากๆ สภาพต้านทานจะลดลงเล็กน้อย ความต้านทานของฉนวนอาจไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อนำไปต่อกับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงมากๆ วัสดุเหล่านี้จะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าได้

4. ตัวนำยิ่งยวด (Super Conductor) คือ ตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีที่สุด มีสมบัติ 2 ประการ คือ

- เป็นตัวนำที่ปราศจากความต้านทาน มีสภาพความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่ออุณหภูมิต่ำมากๆ จนใกล้ศูนย์เคลวิน เรียกว่า อุณหภูมิกวีน

- เป็นสารที่มีแรงผลักดันกับสนามแม่เหล็ก ถ้าวางแท่งแม่เหล็กบนตัวนำยิ่งยวดยิ่งแท่งแม่เหล็ก จะถูกผลักให้ลอย จากความรู้เรื่องตัวนำยิ่งยวดนำไปใช้ ประโยชน์ในการสร้างอุปกรณ์ [32]

โดยสามารถคำนวณความต้านทานไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$\rho = R \frac{A}{\ell} \quad : \text{หน่วย } (\Omega \cdot m) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ ในหน่วย  $(\Omega \cdot m)$

$R$  = ความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานที่สม่ำเสมอของวัสดุ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ ในหน่วย  $m^2$

$\ell$  = ความยาวของชิ้นงาน ในหน่วย  $m$

โดยสามารถคำนวณการนำไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad : \text{หน่วย } (S/m) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ ในหน่วย  $(S/m)$

$\rho$  = ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ ในหน่วย  $(\Omega \cdot m)$

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $\rho(\Omega \cdot m)$ ) และค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $\sigma(S/m)$ ) ที่  $20^\circ C$  [33]

Material	$\rho (\Omega \cdot m)$ at $20^\circ C$ Resistivity	$\sigma (S/m)$ at $20^\circ C$ Conductivity
Silver	$1.59 \times 10^{-8}$	$6.30 \times 10^7$
Copper	$1.68 \times 10^{-8}$	$5.96 \times 10^7$
Gold	$2.44 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^7$
Aluminum	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^7$
Calcium	$3.36 \times 10^{-8}$	$2.98 \times 10^7$
Tungsten	$5.60 \times 10^{-8}$	$1.79 \times 10^7$
Zinc	$5.90 \times 10^{-8}$	$1.69 \times 10^7$
Nickel	$6.99 \times 10^{-8}$	$1.43 \times 10^7$
Lithium	$9.28 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^7$
Iron	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^7$
Platinum	$1.06 \times 10^{-7}$	$9.43 \times 10^6$
Tin	$1.09 \times 10^{-7}$	$9.17 \times 10^6$
Carbon steel	$(10^{10})$	$1.43 \times 10^{-7}$
Lead	$2.2 \times 10^{-7}$	$4.55 \times 10^6$
Titanium	$4.20 \times 10^{-7}$	$2.38 \times 10^6$
Stainless steel	$6.9 \times 10^{-7}$	$1.45 \times 10^6$
Mercury	$9.8 \times 10^{-7}$	$1.02 \times 10^6$
Nichrome	$1.10 \times 10^{-6}$	$9.09 \times 10^5$

### 2.5.3.2 ค่าการนำไฟฟ้า %IACS

IACS (International Annealed Copper Standard) คือ ค่าร้อยละเมื่อเทียบกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของทองแดงเกรดที่ใช้ทำสายไฟ โดยที่ทองแดง มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 100% โดยการนำไฟฟ้าเฉพาะของ 100% IACS สอดคล้องกับ 58 MS/m ด้วยความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถแปลงค่าการนำไฟฟ้าจากหน่วยวัดหนึ่งไปเป็นอีกหน่วยหนึ่งได้ โดยสามารถคำนวณ %IACS ได้ ดังนี้

$$IACS = \frac{X}{X_{Cu}} \times 100 \quad (2.17)$$

เมื่อ  $X$  = ค่าการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสมที่ทดสอบ

$X_{Cu}$  = ค่าการนำไฟฟ้าของทองแดง ( $58.34 MS \cdot m^{-1}$ )

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการนำไฟฟ้า (%IACS) และความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ ( $\mu\Omega/\text{cm}$ ) ที่ 20° C [34]

Material	Conductivity (% IACS)	Resistivity ( $\mu\Omega/\text{cm}$ )
Aluminum bronze	14.00	12.32
Aluminum 7075-T6	32.00	5.39
Aluminum 2024-T4	30.00	5.20
Aluminum 6061	42.00	4.10
Brass	28.00	6.20
Copper nickel 70-30	4.60	37.48
Copper	100.00	1.72
Gold	70.00	2.46
Monel	3.60	47.89
Copper nickel 90-10	9.10	18.95
Cast Steel	10.70	16.02
Hastelloy-X	1.50	115.00
Inconel 600	1.72	100.00
Lead	8.35	20.65
Magnesium	38.60	4.45
Phosphor bronze	11.00	16.00
Silver	105.00	1.64
Stainless Steel 316	2.33	74.00
Stainless Steel 304	2.39	72.00
Sodium	41.50	4.20
Ti-6Al-4V	1.00	172.00
Titanium-2	3.55	48.56
Tungsten	30.51	5.65
Zirconium	4.30	40.00
Zircalloy-2	2.40	72.00

### 2.5.3.3 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าวน 60 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 2.32 เครื่องวัดค่าการนำกระแสไฟฟ้าวน HEC-101 [35]

เป็นการทดสอบการนำไฟฟ้ากระแสวนโดยวิธี NDT ตามหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่เป็นตัวนำในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของกระแสสลับ หากมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นก็คือกระแสไหลวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยของตัวนำแต่ละตัว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแส ซึ่งสามารถใช้ปรากฏการณ์นี้เพื่อตัดสินลักษณะหรือสถานะของตัวนำ โดยหลักการทดสอบกระแสวนคือการวางตัวนำใกล้กับขดลวดกระแสสลับ โดยขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับ ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสสลับนี้จะส่งผ่านตัวนำและมีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับสร้างกระแสไหลวนในตัวนำ และสามารถเปลี่ยนสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับให้แรงหรืออ่อนจากนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและความต้านทาน R ดังนั้นหากพื้นผิวของตัวนำหรือพื้นผิวที่อยู่ใกล้มีตำหนิหรือวัสดุโลหะเปลี่ยนแปลงความเข้มและการกระจายของกระแสไหลก็จะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและความต้านทาน R ตามการเปลี่ยนแปลงนี้กระแสไหลวน [36]



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานของการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กด้วยการเติมโลหะแม่และกระบวนการอัลตราโซนิก ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการมีดังหัวข้อต่อไปนี้

1. การเตรียมวัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
2. ขั้นตอนการทดลอง
  - 2.1 การเตรียมโลหะแม่
  - 2.2 การหลอมอลูมิเนียมผสมเหล็ก
3. การตรวจสอบและทดสอบสมบัติทางกล

#### 3.1 การเตรียมวัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กด้วยการเติมโลหะแม่และกระบวนการอัลตราโซนิก มีดังนี้

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการหล่อโลหะแม่และอลูมิเนียมผสม

1. โลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.98wt. %
2. อลูมิเนียมผสมชนิด Al-20wt.%Fe
3. อลูมิเนียมผสมชนิด Al-10wt.%Zr
4. อลูมิเนียมผสมชนิด Al-10wt.%Ti

##### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

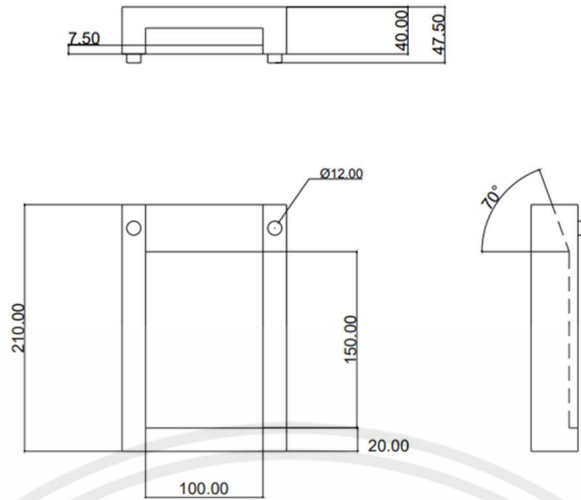
1. กระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
2. สารหล่อลื่น (Lubricant)
3. พงเพชรขนาด 3 ไมครอน
4. ซิลิกาคอลลอยด์ขนาด 0.04 ไมครอน (OP-S)
5. เอทานอล
6. น้ำกลั่น
7. กรด Barker ความเข้มข้น 4%
8. ปีกเกอร์
9. ขวดฉีดน้ำกลั่น (Wash Bottle)
10. แผ่นสีกหลาด
11. เครื่องชั่งแบบดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

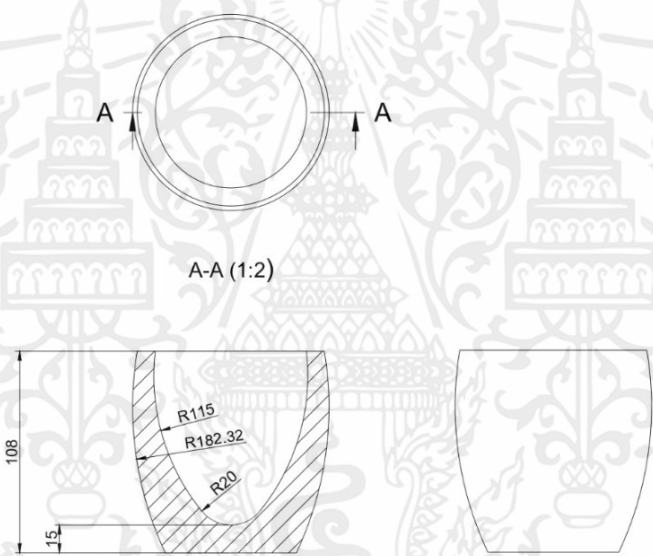
12. เตอบ
13. เตาลอมไฟฟ้าชนิดเหนียวน้ำ
14. เครื่องอัลตราโซนิก
15. ลวดวัดอุณหภูมิชนิด K (Type K)
16. เครื่องเลื่อยตัดชิ้นงาน
17. เครื่องขัดชิ้นงานกระดาษทรายแบบสายพาน
18. เครื่องขัดชิ้นงานกระดาษทรายแบบจานหมุน
19. เครื่องขัดชิ้นงานละเอียด
20. เครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (Spectrometer Emission)
21. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)
22. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)
23. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
24. เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Tester)

### 3.1.3 แบบหล่อที่ใช้สำหรับการทดลอง

แบบหล่อที่ใช้สำหรับการทดลองมีทั้งหมด 2 แบบหล่อ ได้แก่ แบบหล่อชนิดแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) โดยทำมาจากทองแดงซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นงานเป็นแผ่นขนาด 100x150x15 มิลลิเมตร และ แบบหล่อชนิดเบ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) ซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นงานเป็นทรงกรวยหัวตัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 90 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยแบบส่องกราด (ก) และการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (การวิเคราะห์ Element Mapping), (ข) อลูมิเนียม (Al), (ค) ไทเทเนียม (Ti) และ (ง) เซอร์โคเนียม (Zr)

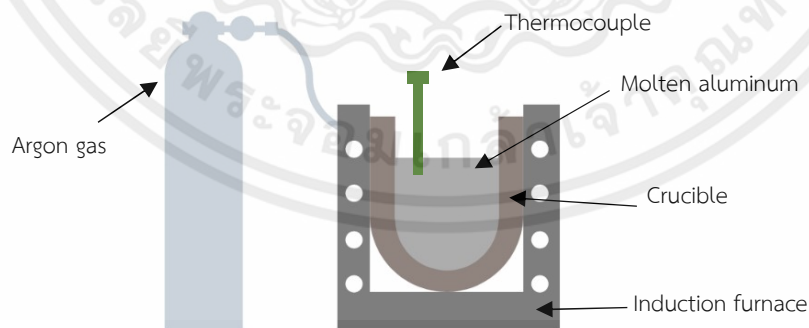
### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

การปรับสภาพโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล จะทำโดยการเติมโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ควบคู่กับการป้อนด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกลงในอลูมิเนียมผสมเหล็ก องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.1 ปริมาณอลูมิเนียมผสมเหล็ก 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมโลหะแม่ให้ได้ปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

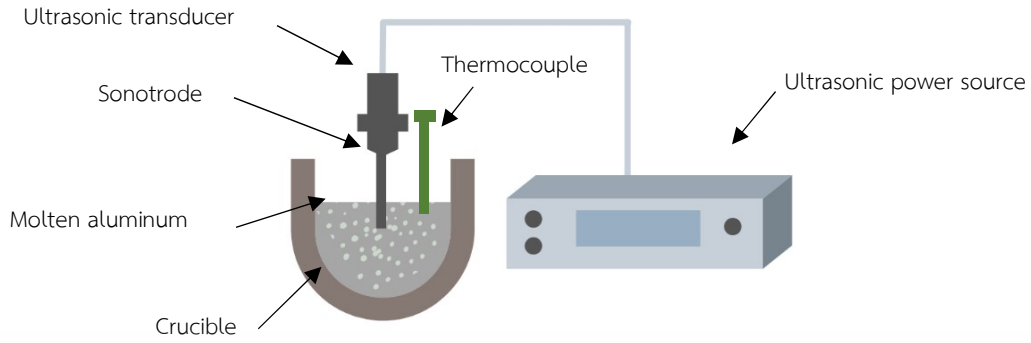
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะที่ใช้ในการทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก, wt.%)

Alloys	Fe	Zr	Ti	Al	เงื่อนไขการทดลอง	
					No UST	UST
Master Alloys	-	8.0	1.6	Bal.	-	-
Al-6Fe	6.0	-	-	Bal.	Al-6Fe	Al-6Fe UST
Al-6Fe-0.2Zr	6.0	0.2	0.04	Bal.	Al-6Fe-0.2Zr	Al-6Fe-0.2Zr UST
Al-6Fe-0.4Zr	6.0	0.4	0.08	Bal.	Al-6Fe-0.4Zr	Al-6Fe-0.4Zr UST
Al-1.6Fe-0.15Zr	1.6	0.15	0.03	Bal.	Al-1.6Fe-0.15Zr	Al-1.6Fe-0.15Zr UST

ในกระบวนการหล่อใช้เตาหลอมไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ โดยนำอินกอตอลูมิเนียมผสมเหล็กหลอมที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมโลหะแม่ตามปริมาณที่กำหนดไว้ เมื่อหลอมละลายแล้วให้เติมฟลักซ์ (Flux) จากนั้นทำการกำจัดตะกรัน (Dross) และทำการไล่แก๊สด้วยแก๊สอาร์กอน หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิของโลหะอลูมิเนียมหลอมเหลวจนถึงอุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปเข้ากระบวนการอัลตราโซนิกที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จนกระทั่งอุณหภูมิของอลูมิเนียมหลอมเหลวลดลงเหลือ 760 องศาเซลเซียส จึงทำการเทลงในแบบหล่อ ในกรณีที่ไม่ทำกระบวนการอัลตราโซนิก เหน้โลหะอลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบหล่อที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานจากบริเวณจุดศูนย์กลางแบบหล่อไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปี ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์ข้อมูลของภาพถ่ายโครงสร้างมหภาค, ขนาดของเกรน และโครงสร้างจุลภาคในโครงสร้างด้วยโปรแกรม Image J Analysis

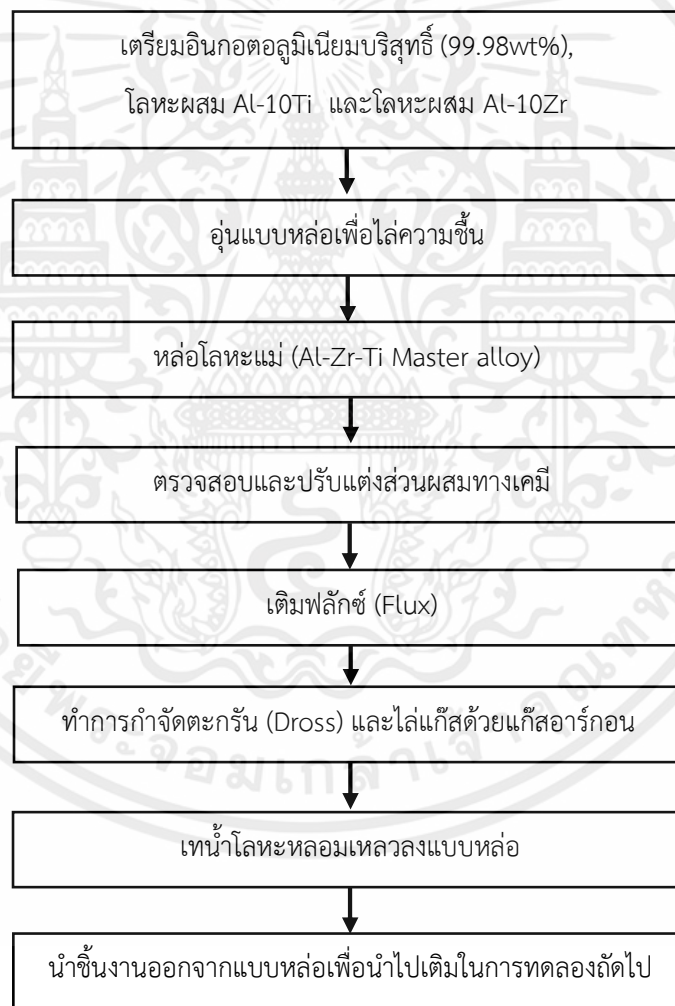


รูปที่ 3.2 กระบวนการหล่อแบบเป่าหลอม



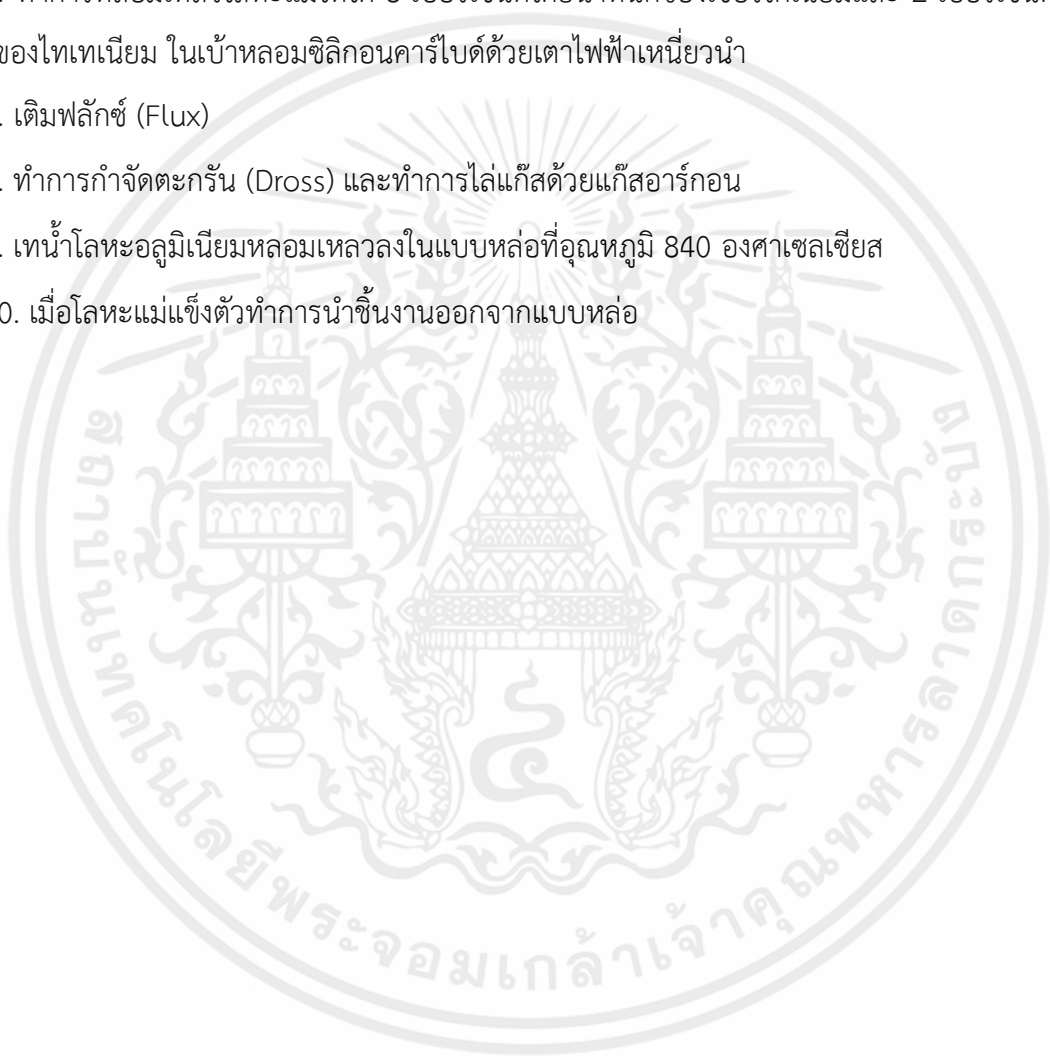
รูปที่ 3.3 กระบวนการอัลตราโซนิก

### 3.2.1 ขั้นตอนการพัฒนาโลหะแม่ (Al-8wt%Zr-Ti master Alloy)

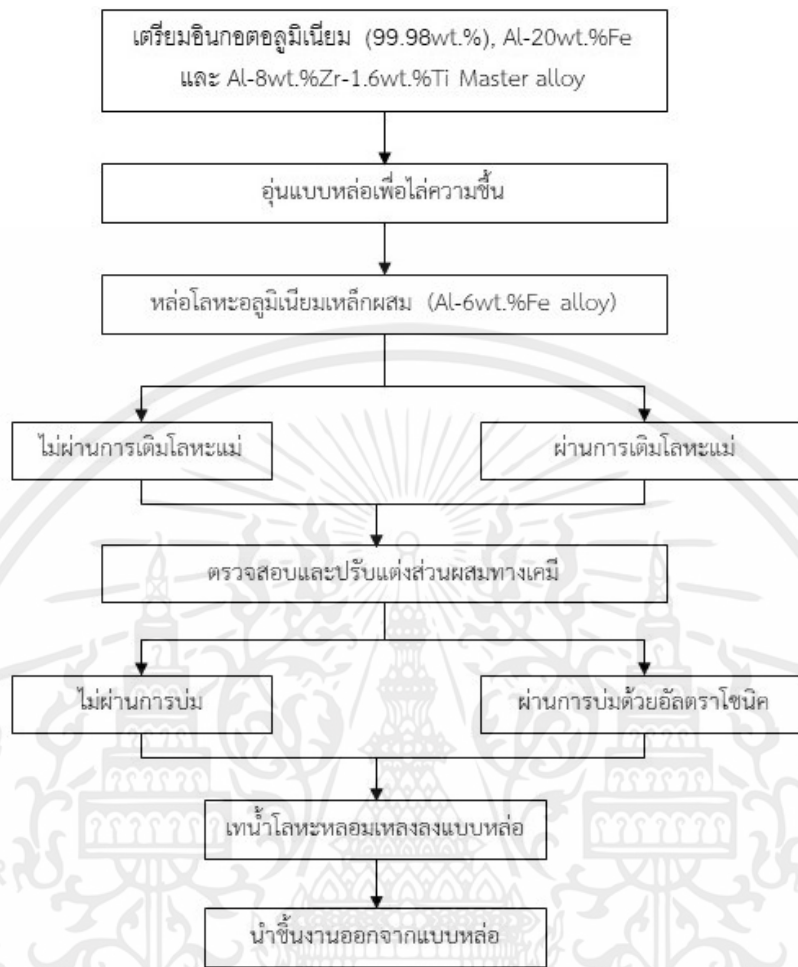


รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการหล่อโลหะแม่ (Master Alloys)

1. เตรียมอินกอตอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.98wt.%), Binary Master Alloy Al-10wt%Zr และ โลหะแม่ Al-10wt%Ti (Binary master Alloy Al-10wt%Ti) โดยการตัดอินกอตออกเป็นแท่งเล็ก ๆ
2. ทำการอุ่นแบบหล่อ
3. เปิดเตาและอุ่นเข้าหลอมให้ความร้อนจนถึง 800 องศาเซลเซียส
4. ทำการหลอมโลหะแม่ที่เตรียมไว้ในข้างต้นลงในเข้าหลอมซิลิกอนคาร์ไบด์
5. ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Spectrometer Emission
6. ทำการหลอมเหลวโลหะแม่ให้ได้ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเซอร์โคเนียมและ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไทเทเนียม ในเข้าหลอมซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
7. เติมฟลักซ์ (Flux)
8. ทำการกำจัดตะกรัน (Dross) และทำการไล่แก๊สด้วยแก๊สอาร์กอน
9. เทน้ำโลหะอลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบหล่อที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส
10. เมื่อโลหะแม่แข็งตัวทำการนำชิ้นงานออกจากแบบหล่อ



### 3.2.2 ขั้นตอนการพัฒนาอลูมิเนียมผสมอลูมิเนียม-เหล็กและกระบวนการอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการหล่ออลูมิเนียมผสมเหล็กและกระบวนการอัลตราโซนิก

1. เตรียมอินกอตอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.98%) และ Al-20Fe ตัดอินกอตเป็นแท่งเล็ก ๆ
2. ทำการอุ่นแบบหล่อที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส
3. เปิดเตาและอุ่นเข้าหลอมให้ความร้อนถึง 850 องศาเซลเซียส
4. ทำการหลอมอลูมิเนียมผสมเหล็กที่เตรียมไว้ในข้างต้นลงในเข้าหลอม
5. ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Spectrometer Emission
6. ทำการหลอมเหลวส่วนผสมให้ได้ 1.6 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็ก
7. เติมฟลักซ์ (Flux)
8. ทำการกำจัดตะกรัน (Dross) และทำการไล่แก๊สด้วยแก๊สอาร์กอน
9. ในกรณีทำกระบวนการอัลตราโซนิก ทำการจุ่ม Sonotrode ลึกประมาณ 2-3 เซนติเมตรจากผิว

ตั้งแต่อุณหภูมิ 820 จนถึง 760 องศาเซลเซียสจากนั้นเทน้ำโลหะอลูมิเนียมหลอมเหลวลงแบบหล่อ

10. ในกรณีที่ไม่ว่างการอบการอัลตราโซนิกหน้าโลหะอลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบหล่อที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส

11. เมื่ออลูมิเนียมผสมเหล็กแข็งตัวทำการนำชิ้นงานออกจากแบบหล่อ

### 3.2.3 ขั้นตอนการหล่ออลูมิเนียมผสมเหล็กด้วยการเติมโลหะแม่และกระบวนการอัลตราโซนิก

1. เตรียมอินกอตอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.98%), Al-20 Fe และ โลหะแม่ (Al-8Zr-1.6Ti Master Alloy) โดยการตัดอินกอตออกเป็นแท่งเล็ก ๆ และนำไปชั่งน้ำหนักให้ได้ตามปริมาณที่คำนวณ

2. ทำการอุ่นแบบหล่อที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

3. เปิดเตาและอุ่นเข้าหลอมให้ความร้อนจนถึง 850 องศาเซลเซียส

4. ทำการหลอมอลูมิเนียมผสมเหล็กและเติมโลหะแม่ที่เตรียมไว้ในข้างต้นลงในเข้าหลอม

5. ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Spectrometer Emission

6. ทำการหลอมเหลวส่วนผสมให้ได้ 1.6 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็กและ 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโลหะแม่เซอร์โคเนียม

7. เติมฟลักซ์ (Flux)

8. ทำการกำจัดตะกรัน (Dross) และทำการไล่แก๊สด้วยแก๊สอาร์กอน

9. ในกรณีทำกระบวนการอัลตราโซนิก ทำการจุ่ม Sonotrode ลึกประมาณ 2-3 เซนติเมตรจากผิว ตั้งแต่อุณหภูมิ 820 จนถึง 760 องศาเซลเซียส สำหรับ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็ก และตั้งแต่อุณหภูมิ 680 จนถึง 620 องศาเซลเซียส สำหรับ 1.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็กจากนั้นเทหน้าโลหะอลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบหล่อ

10. ในกรณีที่ไม่ว่างการอบการอัลตราโซนิก เทหน้าโลหะอลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบหล่อที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส สำหรับ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็ก และอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส สำหรับ 1.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็ก

11. เมื่ออลูมิเนียมผสมเหล็กแข็งตัวทำการนำชิ้นงานออกจากแบบหล่อ

### 3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและการทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.3.1 การทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

1. นำชิ้นงานทดสอบขนาดความหนา 0.5 เซนติเมตร ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกผ่านกระบวนการ X-ray Diffractometer
2. นำผลที่ได้จาก XRD วิเคราะห์องค์ประกอบ

### 3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค (Macrostructure and Microstructure)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและวิเคราะห์โครงสร้างของธาตุที่ปรากฏด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) เพื่อตรวจสอบธาตุ ขนาด และรูปร่างของโครงสร้างเพื่อนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบโครงสร้างต่อไป

1. นำชิ้นงานจากบริเวณจุดศูนย์กลางแบบหล่อมาขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพิร์ชขนาด 3 ไมครอน และซิลิกาโคลลอยด์ (OP-S) ขนาด 0.04 ไมครอน ตามลำดับ
2. ล้างด้วยน้ำสะอาดและฉีดเอทานอลบนหน้าชิ้นงานจากนั้นเป่าด้วยลมร้อน
3. ในกรณีศึกษาโครงสร้างมหภาค นำผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัสสารละลายกรด Barker 4% ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 15 V เป็นระยะเวลาประมาณ 1-2 นาที
4. นำชิ้นงานทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและวิเคราะห์โครงสร้างของธาตุที่ปรากฏด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

### 3.3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานด้วยการทดสอบผ่านเครื่องวัดความแข็ง Vickers Hardness Tester ในหน่วย Vickers ใช้แรงในการกดขนาด 1 kgf. เป็นเวลา 10 วินาที โดยก่อนการเริ่มการทดสอบความแข็ง จะทำการอบชิ้นงานโดยนำชิ้นงานเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียส โดยในแต่ละอุณหภูมิจะไม่ใช้ชิ้นงานทดสอบเดียวกัน โดยจะทำการกดความแข็งในทุกๆ 3 ชั่วโมงเพื่อหาช่วงเวลาการอบที่ให้ ความแข็งสูงสุด

1. นำชิ้นงานจากบริเวณจุดศูนย์กลางแบบหล่อมาขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 1200 เพื่อเปิดผิวของชิ้นงานให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคเพื่อสามารถกดและเห็นรอยกดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น
2. นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียส
3. นำชิ้นงานทดสอบออกจากเตาอบทุกๆ 3 ชั่วโมง เพื่อกดความแข็งและบันทึกผล โดยทำการทดสอบ 10 ตำแหน่งต่อ 1 ชิ้นงานตัวอย่าง
4. เมื่อค่าของความแข็งเริ่มคงที่ นำค่าที่ได้และบันทึกผล จากนั้นนำมาจัดทำกราฟเพื่อพิจารณาผล

### 3.3.4 การทดสอบการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

1. ทำการวัดชิ้นงานตัวอย่างหล่อ (As-Cast Stage) และชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 ชั่วโมง โดยการตัดชิ้นงานจากบริเวณจุดศูนย์กลางแบบหล่อให้มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร ให้ได้ระนาบสม่ำเสมอของชิ้นงานทดสอบ และขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 1200

2. เปิดเครื่องทดสอบการนำไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าวน (Electrical Eddy Current Testing Equipment HEC-102) ที่ความถี่ 60 กิโลเฮิรต์ซ์ ทำการสอบเทียบมาตรฐานของเครื่องทดสอบโดยวัดค่าการไฟฟ้าในอากาศ และการวัดกับชุดทดสอบมาตรฐานการนำไฟฟ้า และกดปุ่ม CAL นำโพรบแต่ละตัวทดสอบทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 วินาที

3. นำเครื่องทดสอบการนำไฟฟ้ากระแสสวนที่ผ่านการเทียบวัดมาตรฐานแล้วมาทดสอบกับชิ้นงานทดสอบที่เตรียมไว้ โดยนำโพรบสัมผัสไปยังหน้าผิวของชิ้นงานทดสอบค้างไว้เป็นเวลา 3 วินาทีอ่านค่าการนำไฟฟ้า %IACS และค่าความต้านทาน

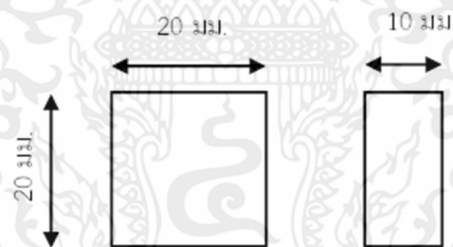
4. ทำการทดสอบ 10 ตำแหน่งต่อ 1 ชิ้นงานตัวอย่าง บันทึกและจัดทำกราฟเพื่อพิจารณาผล

### 3.3.5 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

การทดสอบการกัดกร่อนในที่นี้จะใช้วิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) โดยการใช้เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy และเทคนิค Potentiodynamic Polarization

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เตรียมชิ้นงานทดสอบจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อมาแล้วทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาดความหนา 10 มม. มีขนาดความกว้าง 20 มม. และยาว 20 มม. จากนั้นขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 1000 เพื่อให้ได้ผิวหน้าชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G1 ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.7 การเตรียมชิ้นทดสอบการกัดกร่อน

2. การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า แบ่งออกเป็นสองเทคนิค

1. ทำการทดลองด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy

2. ทำการทดลองด้วยเทคนิค Potentiodynamic Polarization ตามมาตรฐาน ASTM G61-86

reapproved 1998 ข้อมูลที่ได้ คือกราฟ Polarization ซึ่งสามารถตีความเป็นความต้านทาน การกัดกร่อนแบบเฉพาะจุดด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat

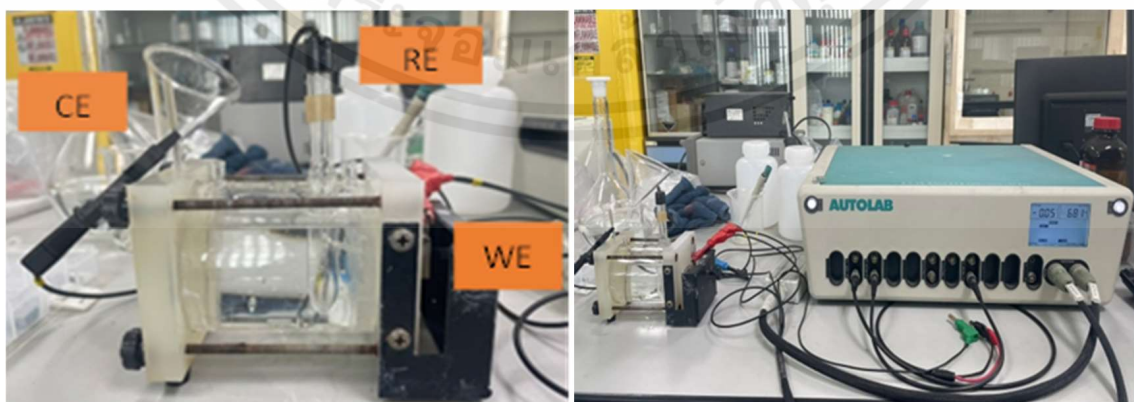
ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy และเทคนิค Potentiodynamic Polarization

1. เตรียมขั้นตอนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G1 ทำการขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 1200
2. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ระดับความเข้มข้น 3.5% โดยน้ำหนักซึ่งมีค่า pH4 ในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการกำจัดไอออนของสารละลายทั้งหมด (Deionized Water)
3. จับยึดชิ้นงานลงในกระปุกแก้วทดลองโดยใช้ผิวหน้าชิ้นงานที่เตรียมไว้ยึดติดกับกระปุกแก้วทดลอง สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่จะใช้ทดสอบทดสอบ 1 ครั้งต่อ 1 ชิ้นทดสอบเมื่อใช้ทดสอบแล้วทำการเปลี่ยนสารละลายใหม่ เพื่อป้องกันไอออนของไฟฟ้าตกค้างในสารละลายดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.8 กระปุกแก้วบรรจุสำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์

4. เติมสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประมาณ 0.3 ลิตรลงในกระปุกแก้ว โดยสารละลายนี้จะเป็นสารละลาย Electrolyte ให้การทำงานของวงจร
5. ต่อขั้วสายไฟจากขั้วการทำงาน (WE) ขั้วช่วย (CE) ขั้วอ้างอิง (RE) โดยใช้ Saturated Calomel Electrode (SEC) เข้าเครื่อง Poteniostat และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผล ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.9 การตั้งขั้วสายวงจรการทำงานของเครื่อง Poteniostat / Galvanostat

6. ทำการเปิดเครื่อง Potentiostat และคอมพิวเตอร์ประมวลผล อัตราการกัดกร่อนใช้โปรแกรม NOVA 1.11 เทคนิคที่ใช้ในการทดสอบคือเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy และเทคนิค Potentiodynamic Polarization

7. กด run เพื่อทำการทดสอบปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี เมื่อทดสอบชิ้นงานเสร็จ ทำการเทสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ออกกระปุกแก้วทดสอบแล้วใช้น้ำ Deionized Water เพื่อทำความสะอาดกระปุกทุกครั้ง เพื่อเป็นการกำจัดไอออนที่ตกค้างภายในกระปุกแก้ว

8. ประมวลผลการทดลองหาค่า  $E_{corr}$  โดยการนำผลการทดลอง Dynamic Polarization มาวิเคราะห์ ค่า E ช่วงของการเกิดฟิล์มป้องกัน หรือช่วง Passivity ของแต่ละชนิดและในแต่ละความเข้มข้นของสารละลาย และนำค่า E และค่าช่วง Passivity ที่ได้มาเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อน



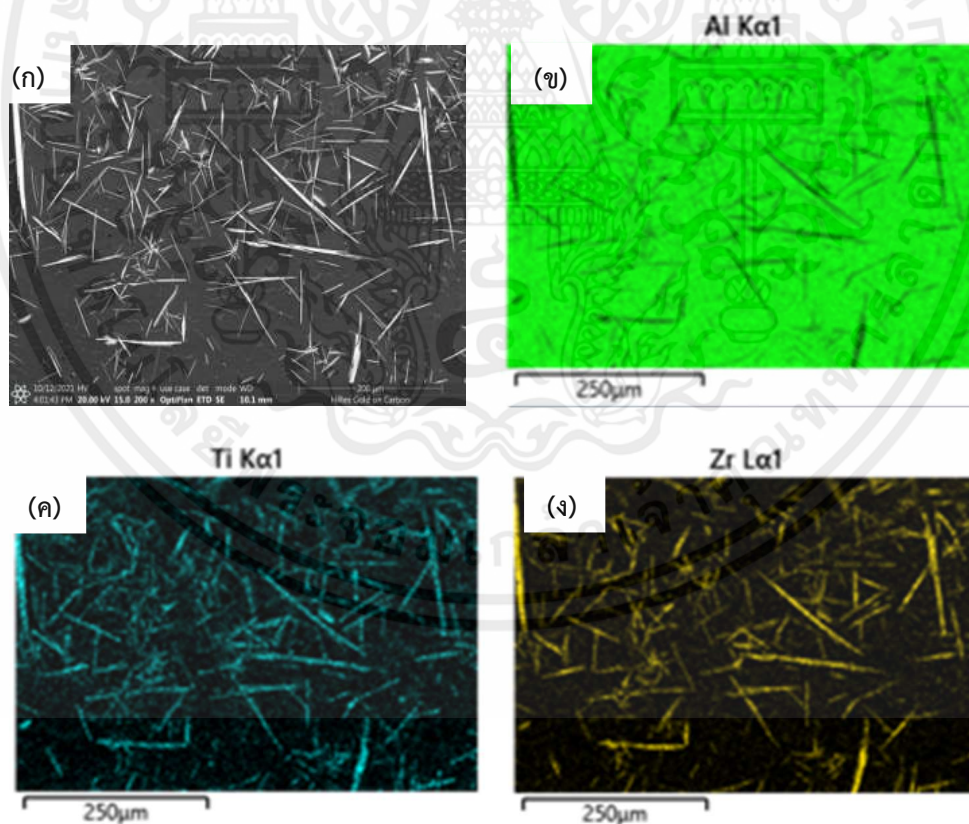
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการเตรียมโลหะแม่อลูมิเนียม-เซอร์โคเนียม-ไทเทเนียม ความเข้มข้นสูง และอิทธิพลของการเติมธาตุเซอร์โคเนียมและกระบวนการอัลตราโซนิกต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล ความต้านทานการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้า โดยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี การทดสอบสมบัติความแข็ง การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) ของ Al-Zr-Ti บนเนื้อพื้นอลูมิเนียม มีลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายเข็มกระจายตัวอยู่บนพื้นอลูมิเนียมเป็นจำนวนมาก ซึ่งคาดว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปรับปรุงสภาพการละลายให้กับอลูมิเนียมผสมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยแบบส่องกราด

(ก) และการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (การวิเคราะห์ Element Mapping), (ข) อลูมิเนียม (Al), (ค) ไทเทเนียม (Ti) และ (ง) เซอร์โคเนียม (Zr)

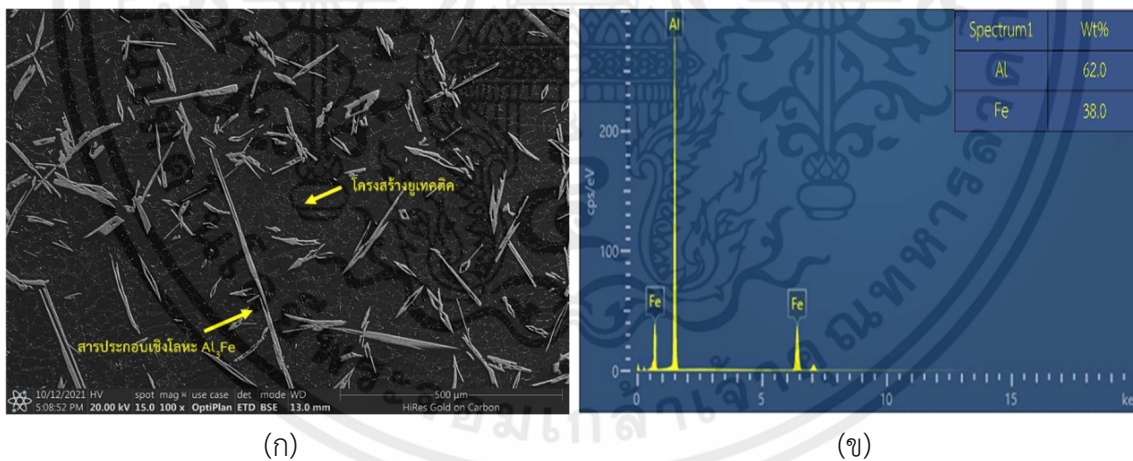
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเหล็กเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก (Al-6Fe)

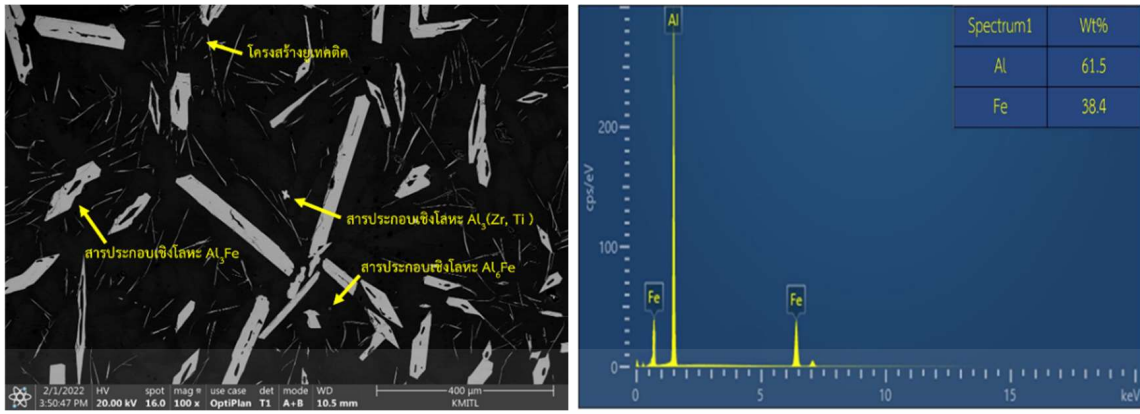
ทำการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเหล็กเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก 4 ส่วนผสมทางเคมีได้แก่ อลูมิเนียมผสมเหล็ก, อลูมิเนียมผสมเหล็ก 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีการเติมโลหะแม่ที่มีองค์ประกอบของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยไม่ผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Al-6Fe-0.2Zr-NoUST, Al-6Fe-0.4Zr-NoUST) และผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Al-6Fe-0.2Zr-UST, Al-6Fe-0.4Zr-UST)

### 4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe

จากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาค พบว่ามียูเทคติกและสารประกอบเชิงโลหะอลูมิเนียมผสมเหล็ก (Intermetallic) กระจายอยู่บนพื้นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และจากผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยเทคนิค EDS โดยจากการวิเคราะห์พบว่าเป็น สารประกอบเชิงโลหะ  $Al_3Fe$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) และจากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมที่มีการเติมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กเซอร์โคเนียมและไทเทเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีด้วย EDS คาดว่าเป็นสารประกอบเชิงโลหะ  $Al_3Fe$ ,  $Al_6Fe$  และ  $Al_3(Zr,Ti)$  และจากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe โดยผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่ไม่ผ่านการบ่ม และ รูปที่ 4.5

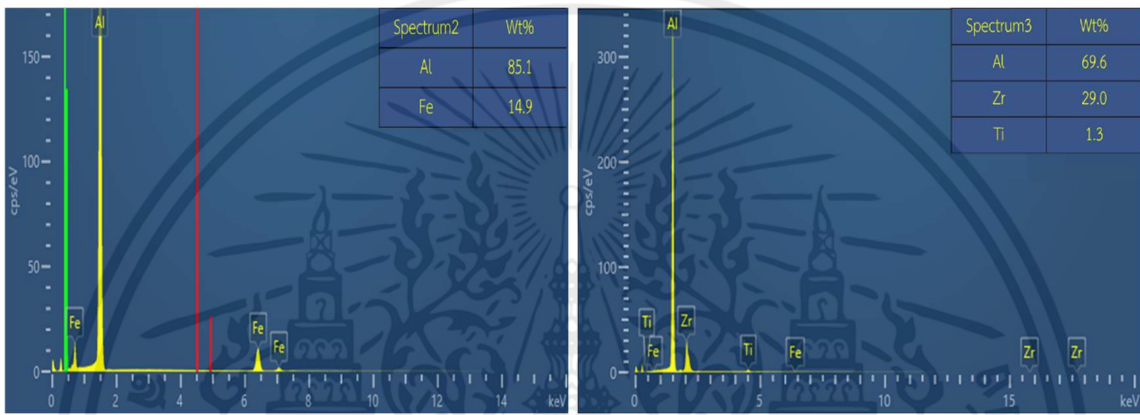


รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe ที่ผ่านการบ่มด้วยอัลตราโซนิก (ก) สารประกอบเชิงโลหะ  $Al_3Fe$  ในอลูมิเนียมผสมเหล็ก (ข) องค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบ  $Al_3Fe$  ด้วยเทคนิค SEM-EDS



(ก)

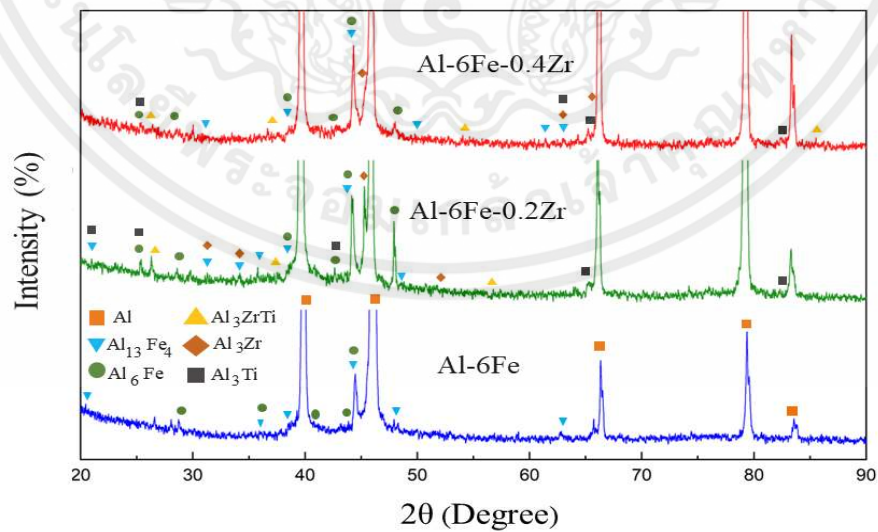
(ข)



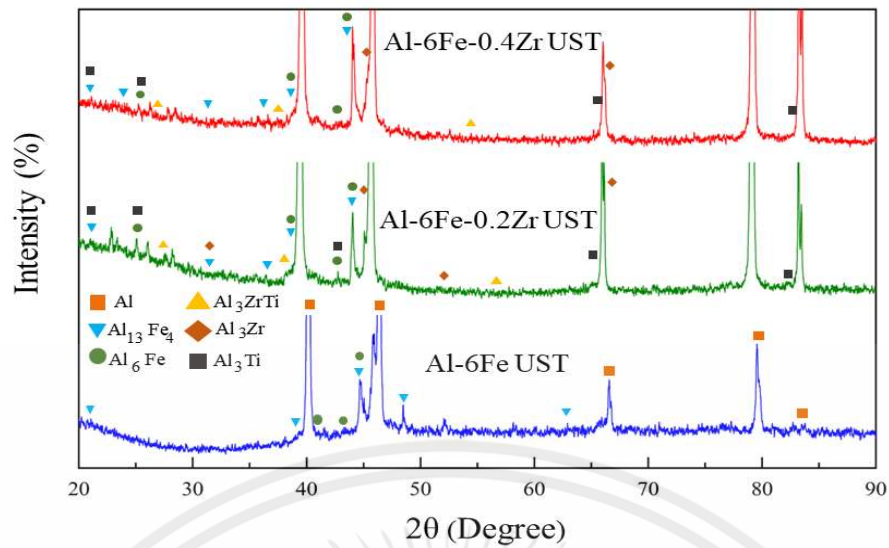
(ค)

(ง)

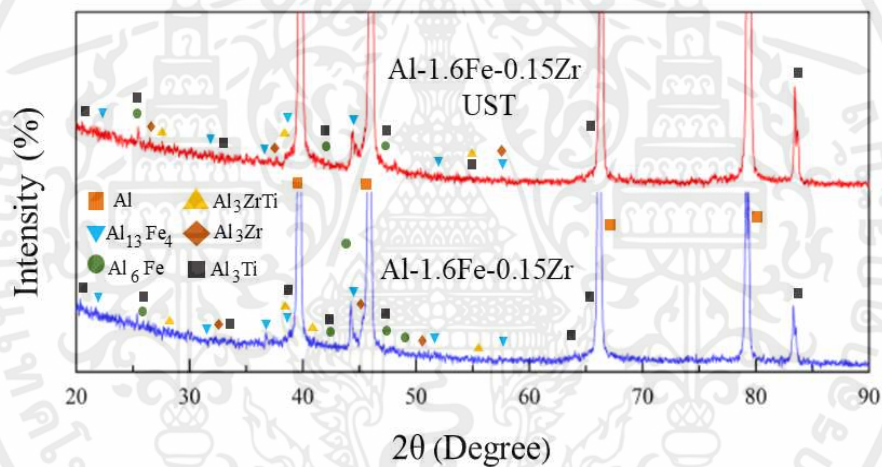
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยอัลตราโซนิก (ก) สารประกอบเชิงโลหะภายในอลูมิเนียมผสมเหล็กและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค SEM-EDS (ข)  $Al_3Fe$  (ค)  $Al_6Fe$  และ (ง)  $Al_3(Zr,Ti)$



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr และ Al-6Fe-0.4Zr เมื่อไม่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยอัลตราโซนิก

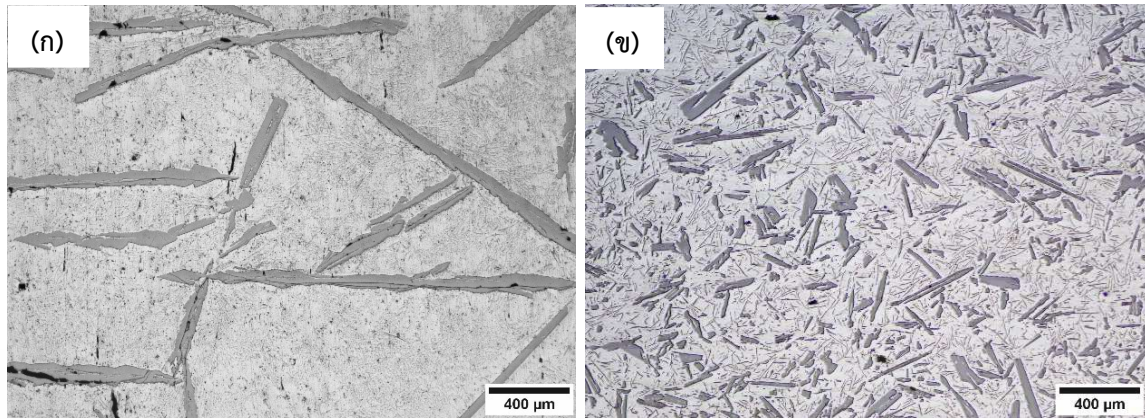


รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr และ Al-6Fe-0.4Zr เมื่อผ่านกระบวนการบ่มด้วยอัลตราโซนิก



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr เมื่อไม่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยอัลตราโซนิก และ Al-1.6Fe-0.15Zr เมื่อผ่านกระบวนการบ่มด้วยอัลตราโซนิก

จากการศึกษาโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสมเหล็ก Al-6Fe ที่ไม่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก พบว่าโครงสร้างยูเทคติกเกรน (Eutectic Colony) มีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ เมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกพบว่า โครงสร้างยูเทคติกเกรนมีขนาดเล็กลง มีการกระจายตัวและรูปร่างสม่ำเสมอ ดังแสดงรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมผสม Al-6Fe (ก) ที่ไม่ผ่านการบ่ม และ(ข) ที่ผ่านการบ่มด้วย กระบวนการอัลตราโซนิก

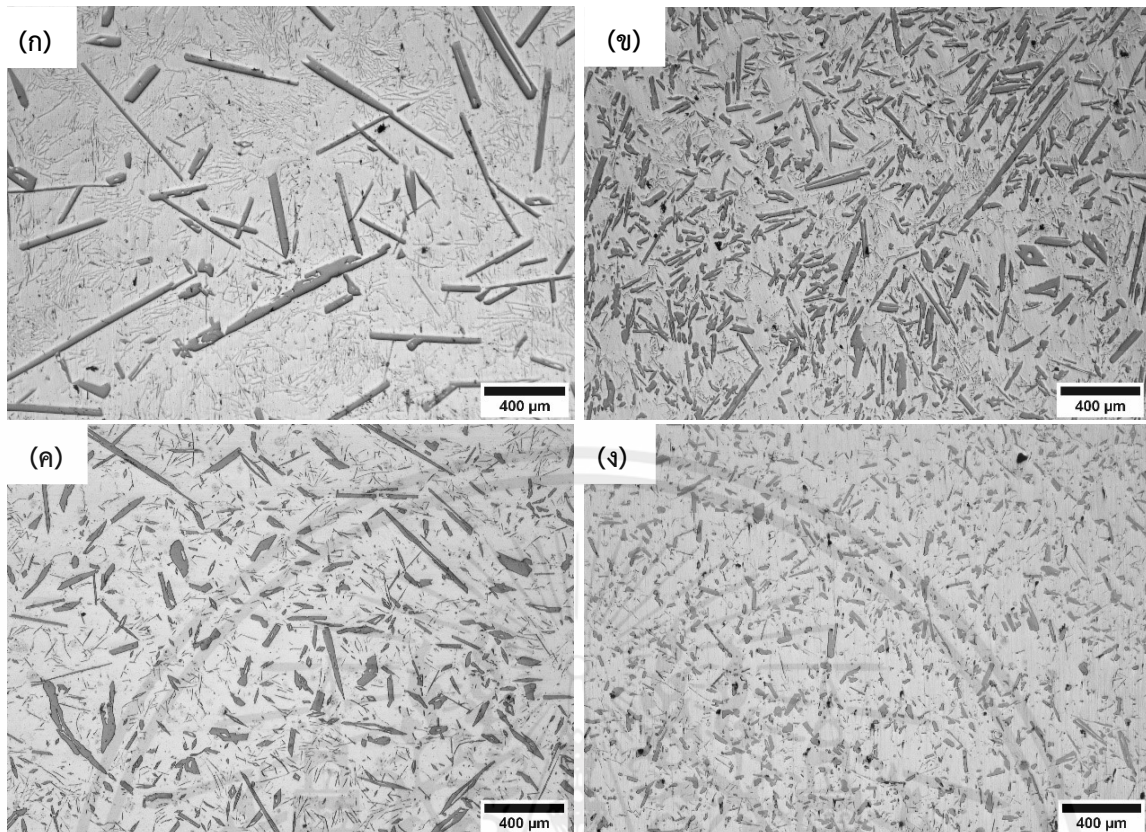
### 4.3 อิทธิพลของการเติมโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti และการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิกต่ออลูมิเนียมผสมเหล็ก

#### 4.3.1 อิทธิพลของการเติมโลหะแม่และการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิกต่อโครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเหล็ก Al-6Fe ที่มีเติมโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ที่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียม 0.2 และ 0.4 wt.% พบว่าความเข้มข้นเซอร์โคเนียม 0.2 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) ส่งผลให้ Intermetallic มีขนาดที่เล็กลงและมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น และเฟสยูเทคติกมีจำนวนที่ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมเซอร์โคเนียมมากขึ้นที่ 0.4 wt.% ส่งผลให้ Intermetallic มีขนาดเล็กลงละเอียดมากขึ้น และเฟสยูเทคติกมีจำนวนที่ลดลงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ค)

และจากการศึกษาการเติมโลหะแม่ในอลูมิเนียมผสมเหล็ก ปริมาณ 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเซอร์โคเนียมและผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก พบว่า Intermetallic เล็กลงมากขึ้น กระจายตัวบนพื้นผิวอลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีส่วนช่วยให้ Intermetallic มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

จากการทดลองพบว่า การบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกสามารถช่วยให้ขนาดของ Intermetallic เล็กลงมากยิ่งขึ้นเนื่องจากเกิดการแตกหักและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้นจากการสั่นสะเทือนของคลื่น และการเติมโลหะแม่ส่งผลให้โครงสร้างละเอียดมากขึ้น อีกทั้งเฟสยูเทคติกมีการลดจำนวนลงเนื่องจากอิทธิพลจากโลหะแม่ ดังรูปที่ 4.8 (ก)-(ง) และเมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกยิ่งส่งผลให้ขนาดและการกระจายตัวของ Intermetallic ดีมากยิ่งขึ้น

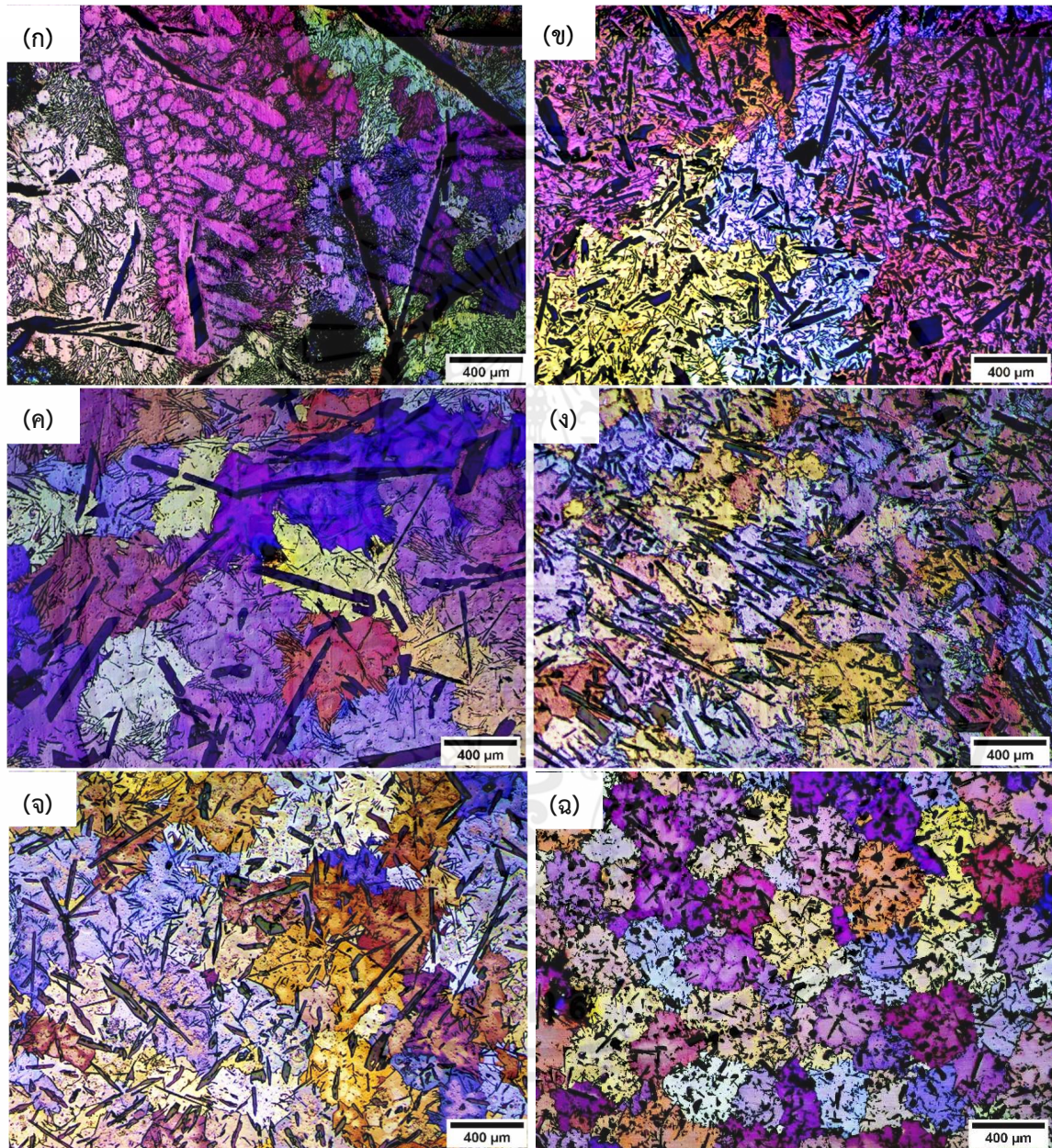


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมผสม AL-6Fe ที่มีการเติมเซอร์โคเนียม 0.2 และ 0.4 ตามลำดับ  
 (ก) Al-6Fe-0.2Zr ที่ผ่านการบ่ม (ข) และไม่ผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (ค) Al-6Fe-0.4Zr  
 ผ่านการบ่ม (ง) และไม่ผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

#### 4.3.2 อิทธิพลของการเติมโลหะแม่และการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิคต่อโครงสร้างมหภาค

จากการศึกษาโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม AL-6Fe ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรนมีลักษณะเกรนที่ใหญ่ ดังรูปที่ 4.9 (ก) เมื่อทำการเติมโลหะแม่ที่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียม 0.2 wt.% ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลง แต่รูปร่างของเกรนไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.9 (ค) และเมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่สูงขึ้นที่ 0.4 wt.% ส่งผลให้เกรนเล็กลงยิ่งขึ้น แสดงในรูปที่ 4.9 (ง) เมื่อทำการปรับสภาพเกรนอลูมิเนียมผสม AL-6Fe โดยการเติมโลหะแม่ร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิค โดยโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม AL-6Fe-0.2Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิค พบว่าเกรนมีความละเอียดมากขึ้นและมีรูปร่างที่สม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.9 (ข) และโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม AL-6Fe-0.4Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิค เกรนมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น มีรูปร่างและขนาดที่สม่ำเสมอมากขึ้นยิ่งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ง) เมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมผสม AL-6Fe ที่ไม่ผ่านการบ่ม

จากผลการทดลองพบว่า การเติมโลหะแม่สามารถช่วยในการปรับสภาพเกรนละเอียดของอลูมิเนียมผสมเหล็ก และการเติมโลหะแม่ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ขนาดเกรนมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เกรนก็มีความไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเติมโลหะแม่วิ่งกับการใช้การบดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก พบว่าทำให้เกรนยิ่งมีความละเอียดมากขึ้น และขนาดสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น



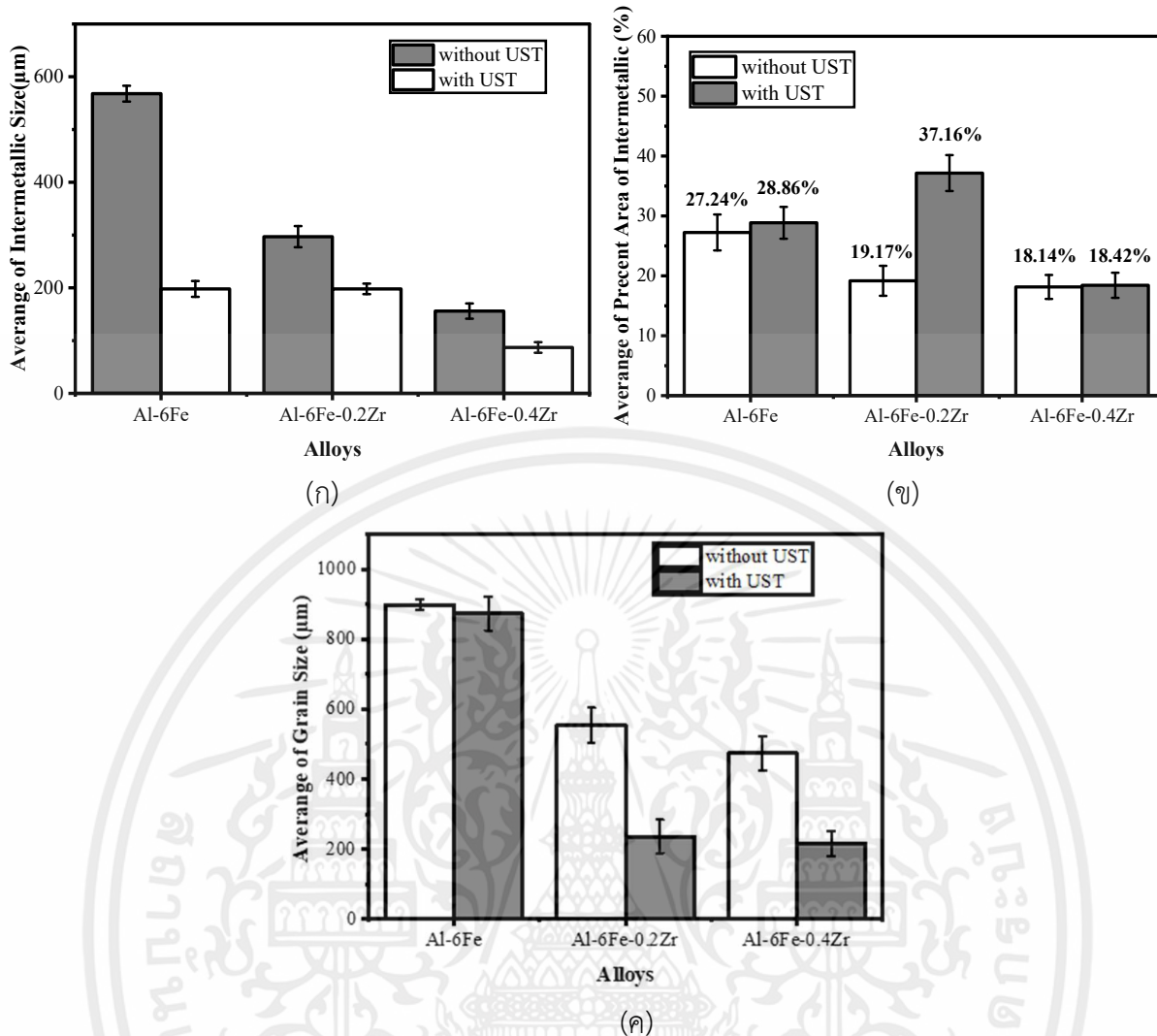
รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe (ก) Al-6Fe No UST, (ข) Al-6Fe UST  
 (ค) Al-6Fe-0.2Zr No UST, (ง) Al-6Fe-0.2Zr UST, (จ) Al-6Fe-0.4Zr No UST และ  
 (ฉ) Al-6Fe-0.2Zr No UST

จากผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) และขนาดเกรน พบว่า โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเหล็ก (Al-6Fe) สารประกอบเชิงโลหะ  $Al_3Fe$  มีลักษณะเป็นเส้นยาว ขนาด โดยเฉลี่ยเท่ากับ  $568 \pm 10$  ไมครอน มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมออยู่บนเนื้อพื้นของอลูมิเนียม (สีขาว) และ เฟสยูเทคติก (สีเทา) เมื่อมีการเติมโลหะแมกนีเซียมในปริมาณ 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่ามีส่วนช่วย ทำให้ขนาดของ Intermetallic เล็กลงเนื่องจากการทำให้เกิดการแตกหักและกระจายตัวไปทั่วพื้นอลูมิเนียม อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งมีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $297 \pm 10$  และ  $156 \pm 10$  ไมครอนดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก)

เมื่อใช้ร่วมกับการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิคพบว่าสารประกอบเชิงโลหะมีขนาดที่เล็กลงโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $198 \pm 10$ ,  $198 \pm 10$  และ  $87 \pm 10$  ไมครอนตามลำดับและกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ซึ่งผลจากการวัดสัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะบนพื้นผิวของอลูมิเนียมพบว่า อลูมิเนียมผสมเหล็ก Al-6Fe ที่มีการเติมโลหะแมกนีเซียมในปริมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเซอร์โคเนียมและใช้ร่วมกับการบ่มด้วย คลื่นอัลตราโซนิคพบว่ามีส่วนพื้นที่ของ Intermetallic บนพื้นผิวของอลูมิเนียมมากที่สุดเท่ากับ 37.16% ในขณะที่อลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิคนั้นมีสัดส่วนพื้นที่ของ Intermetallic บนพื้นผิวของอลูมิเนียม เท่ากับ 18.42% ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข)

เมื่อพิจารณาจากขนาดและเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของ Intermetallic ในเชิงปริมาณของการเติมโลหะแมกนีเซียม ร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิค ดังแสดงรูปที่ 4.10 (ก) และ 4.10 (ข) พบว่าที่อลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิคมีขนาดของ Intermetallic เล็กมากที่สุด โดยเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ มีความแตกต่างกับอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr ที่ไม่ผ่านการบ่มอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม อลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.2Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิคมีขนาดโดยเฉลี่ยของ Intermetallic มากกว่าอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr และให้เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มากกว่าเท่ากับ 37.16% ซึ่งมากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนของ Intermetallic ของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr ที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตาม ปริมาณการเติมโลหะแมกนีเซียม

จากการทดลองพบว่า การบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิคสามารถช่วยให้ขนาดของ Intermetallic เล็กลงมากยิ่งขึ้นเนื่องจากเกิดการแตกหักและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้นจากการ สั่นสะเทือนของคลื่น และการเติมโลหะแมกนีเซียมส่งผลให้โครงสร้างละเอียดมากขึ้น และเมื่อผ่านการบ่มด้วย กระบวนการอัลตราโซนิคยังส่งผลให้ขนาดและการกระจายตัวของ Intermetallic ดีมากยิ่งขึ้น

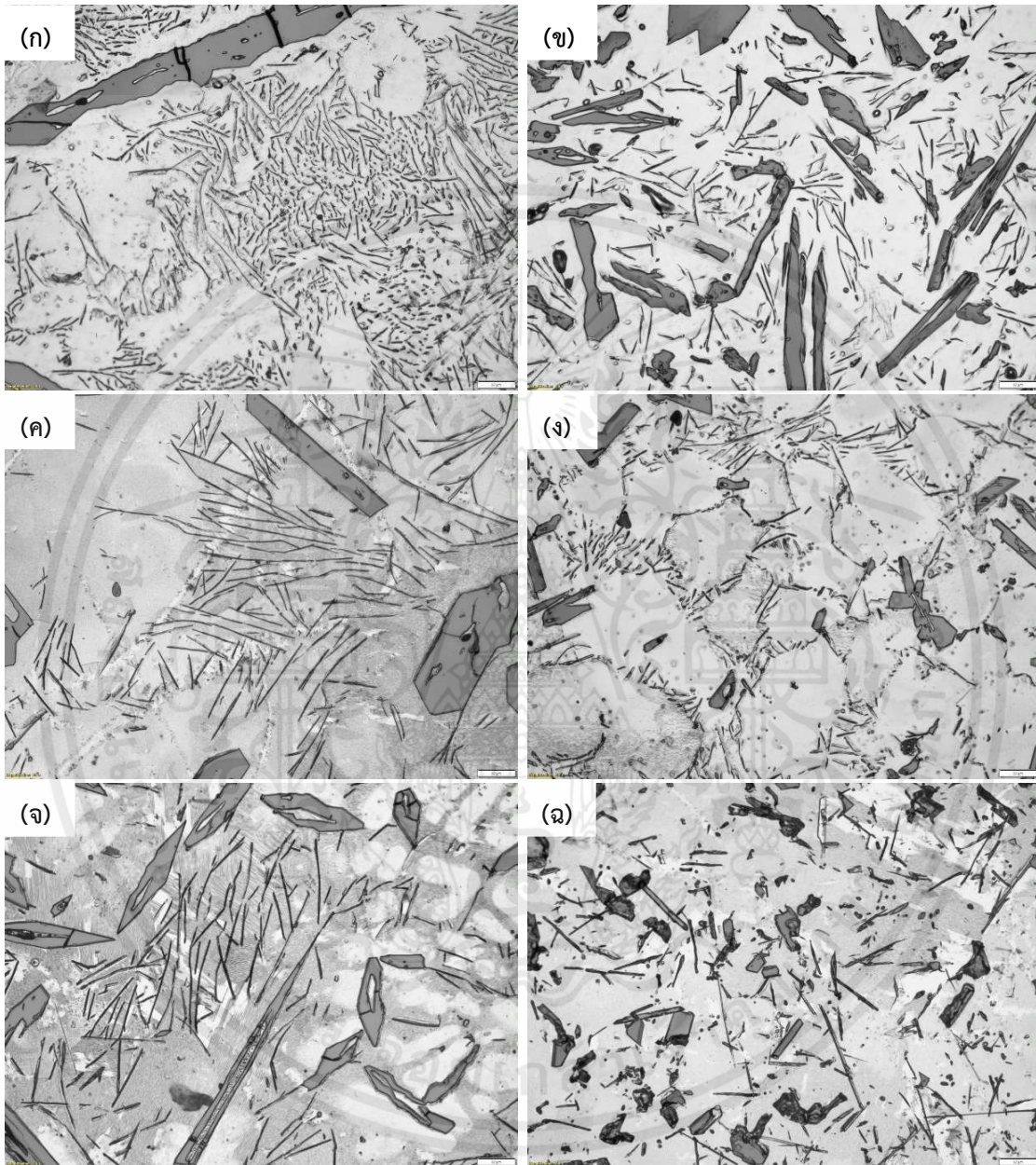


รูปที่ 4.10 ขนาดเฉลี่ยของสารประกอบเชิงโลหะของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe ที่ไม่ผ่านการบ่มและผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (ก) ขนาดของสารประกอบเชิงโลหะ (ข) เปอร์เซ็นต์พื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะและ (ค) ขนาดเกรน

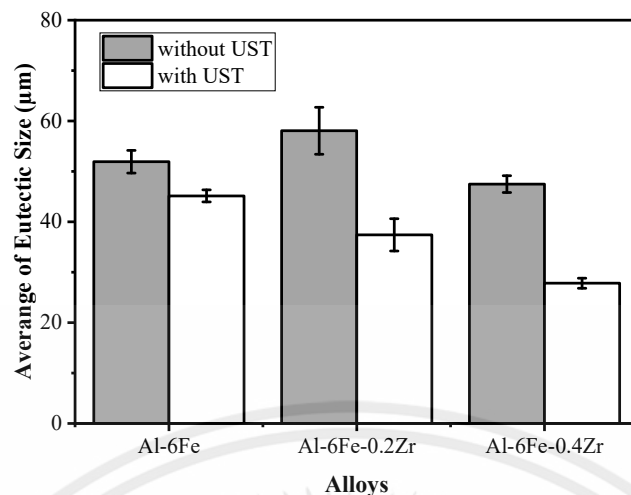
#### 4.4 อิทธิพลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเหล็ก

จากการทดลองเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียม พบว่าขนาดเฟสยูเทคติกของอลูมิเนียมผสมเหล็กที่มีการเติมโลหะแม่มากขึ้นและใช้ร่วมกับการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ทำให้มีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ และมีปลายแหลม รูปทรงไม่แน่นอน และมีความหยาบมากขึ้น กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวของอลูมิเนียมดังรูปที่ 4.11 ซึ่งพบว่าที่อลูมิเนียมผสมเหล็กที่มีการเติมโลหะแม่ในปริมาณ 0.4 wt.%Zr และใช้ร่วมกับการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีความหยาบของเฟสยูเทคติกมากที่สุด โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 27.82 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมผสมเหล็ก Al-6Fe และ Al-6Fe-0.2wt.%Zr ที่ไม่ผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เฟสยูเทคติกมีลักษณะกลมมน และมีบางส่วนที่มีลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน และมีเฟสที่ละเอียดมากกว่าและมีจำนวนมากกว่าในเชิงปริมาณ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D. Eskin [15] ที่อธิบายว่า การเกิดขึ้นของ Primary  $Al_3Zr$  ส่งผลให้เกิดการปรับสภาพของอนุภาคอย่าง มีนัยสำคัญผ่านการสร้างนิวเคลียสและการแตกตัวของอนุภาค และการเติมธาตุไทเทเนียมปริมาณเล็กน้อย สามารถส่งเสริมการเกิด Primary  $Al_3Zr$  เพิ่มมากขึ้นจากการที่เฟสยูเทคติกถูกลดจำนวนลง



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของเฟสยูเทคติกของอลูมิเนียมผสมเหล็ก (ก) Al-6Fe-NoUST (ข) Al-6Fe-UST (ค) Al-6Fe-0.2 wt.%Zr-NoUST (ง) Al-6Fe-0.2 wt.%Zr-UST (จ) Al-6Fe-0.4 wt.%Zr-NoUST และ (ฉ) Al-6Fe-0.4 wt.%Zr-UST



รูปที่ 4.12 ขนาดยูเทคติกโดยเฉลี่ยของอลูมิเนียมผสมเหล็ก

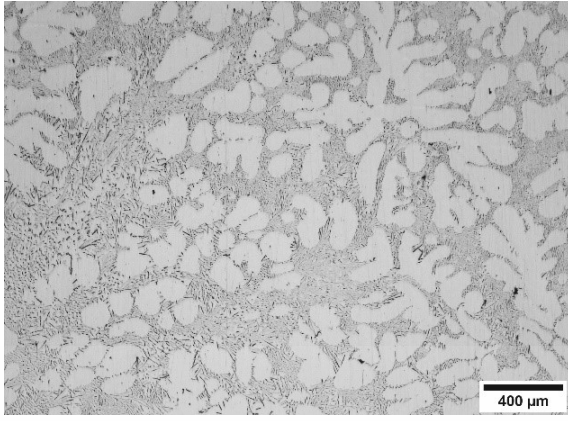
#### 4.5 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเกรดไฮโปยูเทคติก (Al-1.6Fe)

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมเกรดไฮโปยูเทคติก ได้แก่ อลูมิเนียมผสมเหล็ก 1.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Al-1.6Fe-0.15Zr) เพื่อศึกษาอิทธิพลของโลหะแม่อลูมิเนียม เซอร์โคเนียม 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไทเทเนียม 1.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Al-8Zr-1.6Ti) และการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ผ่านการบ่ม พบว่าโครงสร้างมีเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) ที่ประกอบด้วยเฟสยูเทคติก  $Al+Al_3Fe$  และ  $\alpha-Al$  ดังแสดงในรูปที่ 4.13

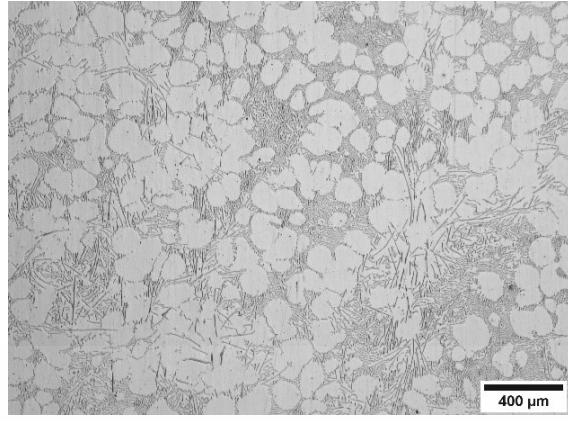
##### 4.5.1 อิทธิพลของกระบวนการอัลตราโซนิกต่อโครงสร้างเฟสยูเทคติกของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe

รูปที่ 4.13 (ก) โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ได้ผ่านการบ่ม พบว่าประกอบด้วยเฟสยูเทคติก  $Al+Al_3Fe$  มีกลมมน และมีบางส่วนที่มีลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน เมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก พบว่าเฟสยูเทคติกมีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ มีปลายแหลม รูปทรงไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ข)

ขนาดเฉลี่ยของเฟสยูเทคติกอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ได้ผ่านการบ่ม พบว่ามีขนาด 53.88  $\mu m$  ในขณะที่เมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ทำให้ขนาดของเฟสยูเทคติกมีขนาดเล็กลงเท่ากับ 35.84  $\mu m$  อธิบายได้ว่าการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก มีผลให้เฟสยูเทคติกเกิดการแตกหักและกระจายตัวไปทั่วพื้นอลูมิเนียมด้วยรูปร่างที่สม่ำเสมอมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงรูปที่ 4.14

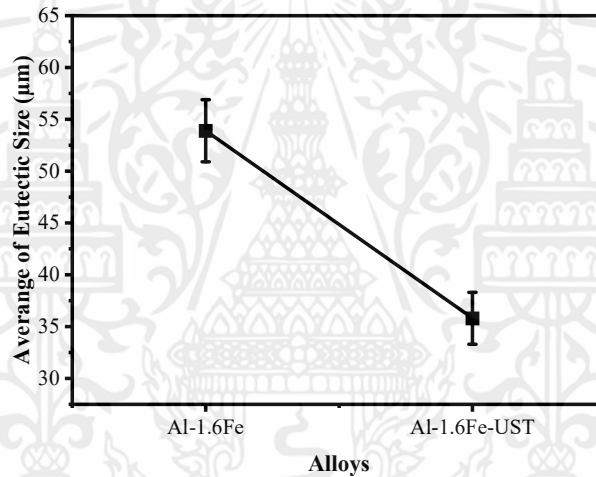


(ก)



(ข)

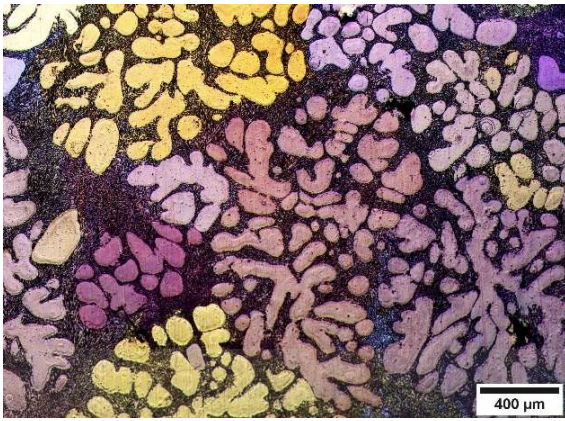
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe (ก) ไม่ผ่านการบ่ม (ข) ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก



รูปที่ 4.14 ขนาดยูเทคติกโดยเฉลี่ยของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe ที่ไม่ผ่านและผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก

#### 4.5.2 ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr

รูปที่ 4.15 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคพบว่าอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ผ่านการบ่ม มีลักษณะเกรนที่ใหญ่และไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกทำให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงและเกรนละเอียดมากขึ้น ดังรูปที่ 4.15 (ข) โดยขนาดเกรนโดยเฉลี่ยของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ผ่านการบ่ม พบว่ามีขนาดเกรนเท่ากับ  $872 \pm 10$  ไมครอน และเมื่อบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงมากขึ้นเท่ากับ  $355 \pm 10$  ไมครอน แสดงดังรูปที่ 4.16

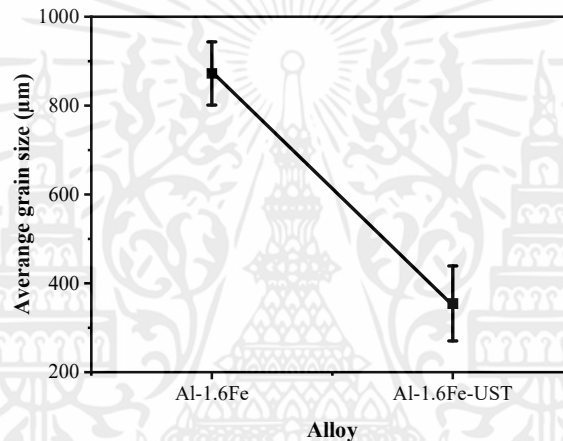


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 การปรับสภาพเกรนละเอียดของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe (ก) ไม่ผ่านการบ่ม (ข) ผ่านการบ่ม



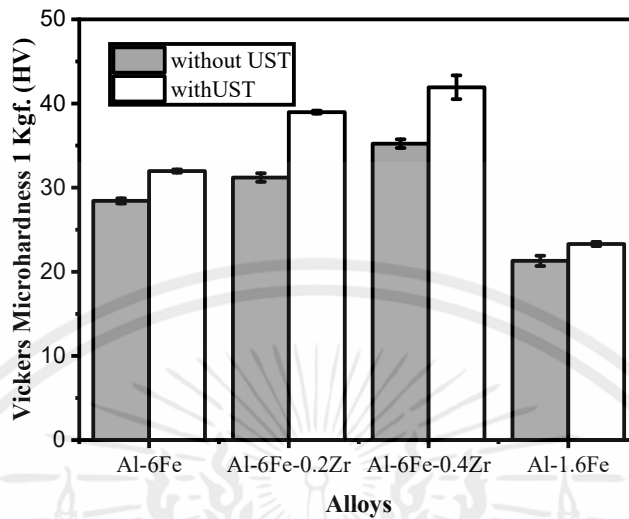
รูปที่ 4.16 ขนาดเกรนเฉลี่ยของอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe ที่ไม่ผ่านและผ่านการบ่มโดยกระบวนการอัลตราโซนิก

#### 4.6 สมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe

##### 4.6.1 ความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสมเหล็ก (ชิ้นงานหล่อ)

จากอิทธิพลการปรับแต่งขนาดเกรน ซึ่งขนาดผลึกจะลดลงหลังจากการเติม Fe ใน Al เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสมเหล็กเพิ่มขึ้น [12] และเมื่อมีการเติมปริมาณโลหะแมงกานีสในอลูมิเนียมผสมเหล็กมีส่วนช่วยในการปรับแต่งเกรนโดยมีอนุภาค  $Al_3Zr$  ไปลดการโตของเกรนอลูมิเนียม จึงทำให้ขนาดของเกรนมีความละเอียดมากขึ้น [16] อีกทั้งการใช้คลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีส่วนช่วยในการปรับสภาพโครงสร้างเกรนให้มีความละเอียดมากขึ้น ทำให้เฟส  $Al_3Zr$  มีขนาดเล็กและเกิดการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้เพิ่มสมบัติทางกล [19] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสมเหล็กชนิด Al-6Fe เมื่อเติมโลหะแมงกานีสปริมาณ 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเซอร์โคเนียม และ Al-1.6Fe ที่ไม่ผ่านการบ่มและผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมโลหะแมงกานีสในปริมาณที่มากขึ้นนอกจากจะส่งผลให้

ขนาดเกรนมีความละเอียดมากขึ้น ยังมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งจาก 28.43 เป็น 35.23 HV และหากใช้ร่วมกับการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิกส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 41.93 HV ดังแสดงในรูปที่ 4.17



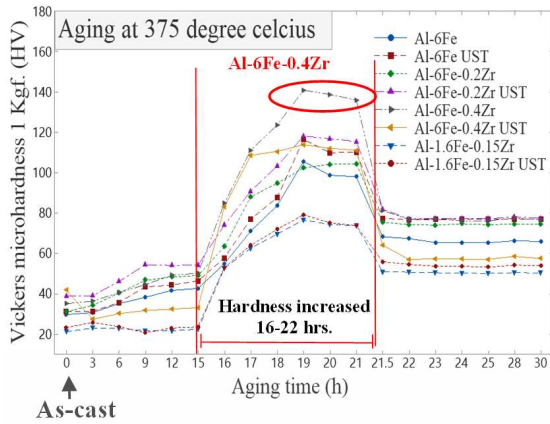
รูปที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมที่สภาวะหล่อ(As-Cast) ที่ไม่ผ่านการบ่มและที่ผ่านการบ่มโดยกระบวนการอัลตราโซนิก

#### 4.6.2 ความแข็งของอลูมิเนียมผสมเหล็กที่ผ่านการบ่มแข็ง (As-Aging)

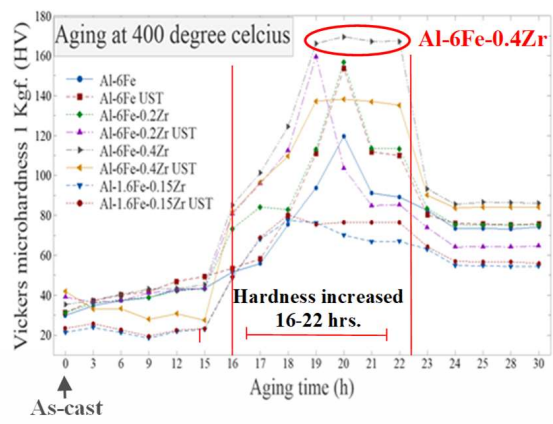
##### 4.6.2.1 อิทธิพลของระยะเวลาในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิในการบ่ม 375 และ 400 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง

ผลการทดสอบความแข็งของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr, Al-6Fe-0.4Zr และ Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ผ่านการบ่มและที่ผ่านการบ่มโดยกระบวนการอัลตราโซนิก จากค่าเฉลี่ยภายในชิ้นงานตัวอย่างอลูมิเนียมผสมเมื่อผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 16 โดยในรูปที่ 4.18 (ก) ค่าความแข็งสูงสุด มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจนถึงในชั่วโมงที่ 21 จากนั้นค่าความแข็งลดลงและเสถียรในชั่วโมงที่ 22 เป็นต้นไป และในรูปที่ 4.18 (ข) ความแข็งสูงสุด มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงชั่วโมงที่ 22 จากนั้นค่าความแข็งลดลง และเสถียรในชั่วโมงที่ 23 เป็นต้นไป

รูปที่ 4.18 (ข) แสดงค่าความแข็งเมื่อผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งที่จุดสูงสุด เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) เมื่อเพิ่มเวลาการบ่มแข็งมากขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ซึ่งเป็นผลมาจากการการตกตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะ  $Al_3(Zr,Ti)$  ที่อุณหภูมิเหมาะสม ส่งผลให้ผลึกที่ตกตะกอน (Precipitates) มีการเติบโตเพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากช่วงความแข็งสูงสุดและมีค่าคงที่ [38]



(ก)



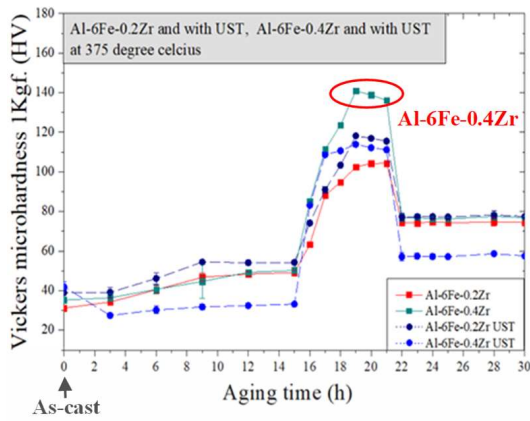
(ข)

รูปที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมเหล็ก Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr, Al-6Fe-0.4Zr และ Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ผ่านการบ่มและที่ผ่านการบ่มโดยกระบวนการอัลตราโซนิก (ก) บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และ (ข) บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

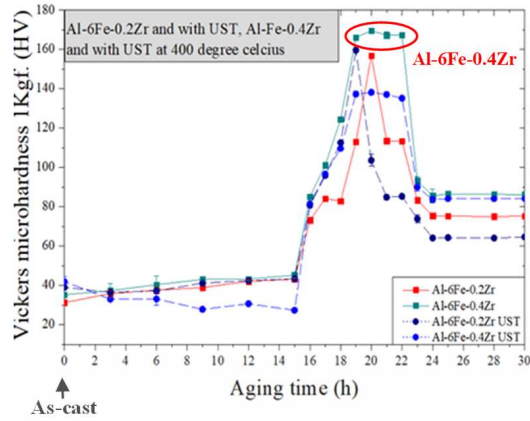
#### 4.6.2.2 อิทธิพลของเซอร์โคเนียมที่มีผลต่อความแข็งของอลูมิเนียมผสม

ผลการทดสอบความแข็งของอลูมิเนียมผสมชนิด Al-6Fe-0.2Zr, Al-6Fe-0.2Zr UST, Al-6Fe-0.4Zr, และ Al-6Fe-0.4Zr UST เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของชิ้นงานที่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียมแตกต่างกัน จากรูปที่ 4.19 (ก) ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 4.19 (ข) ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาระยะเวลา 30 ชั่วโมง พบว่าโลหะแม่ที่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียม 0.4 wt.% จากรูป 4.17 (ก) ค่าความแข็งสูงสุดที่การบ่มในช่วง 16-21 ชั่วโมง และจากรูปที่ 4.19 (ข) ค่าความแข็งสูงสุดที่การบ่ม 16-22 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน

และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของชิ้นงานบ่มที่อุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ในโลหะแม่ที่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียมที่แตกต่างกัน เมื่อผ่านการบ่มและไม่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก พบว่าชิ้นงานเมื่อไม่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกในปริมาณเซอร์โคเนียม 0.4 wt.% มีค่าความแข็งสูงสุดเป็นผลมาจากการเติมเซอร์โคเนียมในปริมาณ 0.4 wt.% มีปริมาณตัวถูกละลายสูง ส่งผลให้การตกตะกอนของผลึก  $Al_3Zr$  มีปริมาณมากและ ความหนาแน่นสูงขึ้นของตะกอนที่มีขนาดเล็กนำไปสู่ความแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมโลหะแม่ที่ปริมาณเซอร์โคเนียม 0.4 wt.% ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ก่อให้เกิดการนิวคลีเอชันภายในโครงสร้างในปริมาณมากซึ่งส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคที่มีความละเอียดสูง จึงไม่หลงเหลือผลึกในการตกตะกอนของผลึก  $Al_3Zr$  เมื่อผ่านการทำการบ่มแข็ง จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งน้อยลง



(ก)



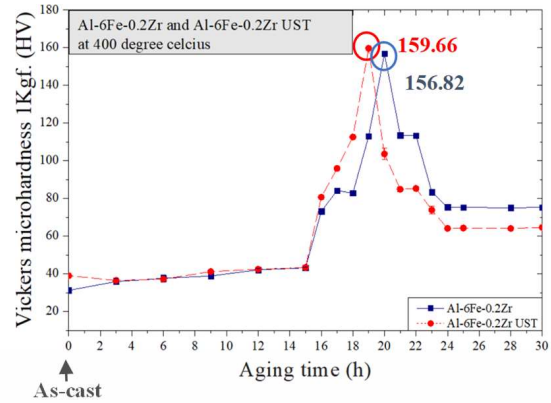
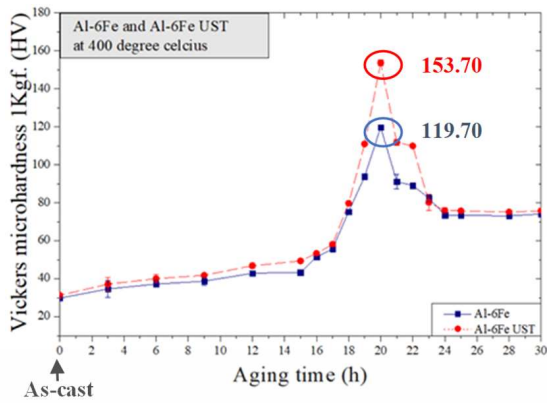
(ข)

รูปที่ 4.19 อิทธิพลของเซอร์โคเนียมที่มีผลต่อสมบัติความแข็งของอลูมิเนียมผสมเหล็กชนิด Al-6Fe และ Al-1.6Fe (ก) บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส (ข) บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

#### 4.6.2.3 อิทธิพลของกระบวนการอัลตราโซนิกที่มีผลต่อความแข็งของอลูมิเนียมผสมเหล็ก

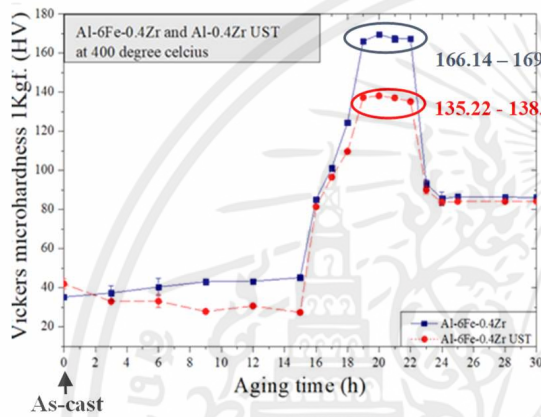
ผลการทดสอบความแข็งของอลูมิเนียมผสมชนิด Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr, Al-6Fe-0.4Zr, และ Al-1.6Fe-0.15Zr ที่ไม่ผ่านการบ่มและที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก อุณหภูมิการบ่ม 400 องศาเซลเซียส จากการพิจารณาพบว่าอลูมิเนียมผสมผสมเมื่อผ่านการบ่มด้วยอัลตราโซนิกมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมผสมเหล็กที่ไม่ผ่านการบ่ม ในระยะเวลาการบ่มแข็ง 30 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) ค่าความแข็งของชิ้นงาน Al-6Fe เพิ่มขึ้นจาก 119.70 เป็น 153.70 HV รูปที่ 4.20 (ข) ค่าความแข็งของชิ้นงาน Al-6Fe-0.2Zr เพิ่มขึ้นจาก 156.82 เป็น 159.66 HV รูปที่ 4.20 (ง) ค่าความแข็งของชิ้นงาน Al-1.6Fe-0.15Zr เพิ่มขึ้นจาก 76.28 เป็น 80.30 HV ภายหลังจากการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก

และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาระยะ 30 ชั่วโมง ที่เวลาแตกต่างกัน พบว่าโลหะอลูมิเนียมผสมที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูง เป็นผลมาจากการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น สารประกอบเชิงโลหะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ อีกทั้งมีผลึก  $Al_3Fe$  หลงเหลือในการตกตะกอนภายในพื้นผิวของเฟสเมื่อทำการบ่มแข็ง ทำให้ค่าความแข็งเมื่อบ่มสูงกว่าอลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ยกเว้นในกรณีของ Al-6Fe-0.4Zr ที่บ่มและไม่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ดังรูปที่ 4.20 (ค) ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของปริมาณการเติมเซอร์โคเนียมของโลหะแม่ ดังแสดงข้างต้นในหัวข้อ 4.6.1.2

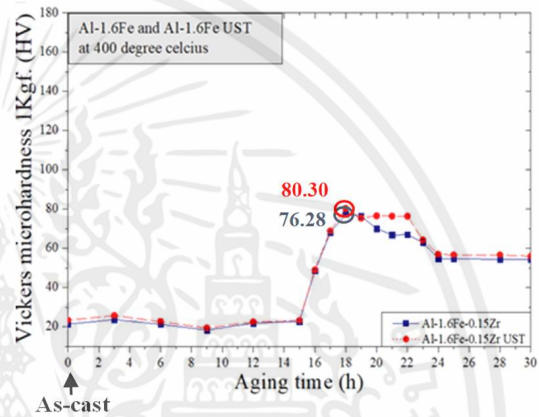


(ก)

(ข)



(ค)



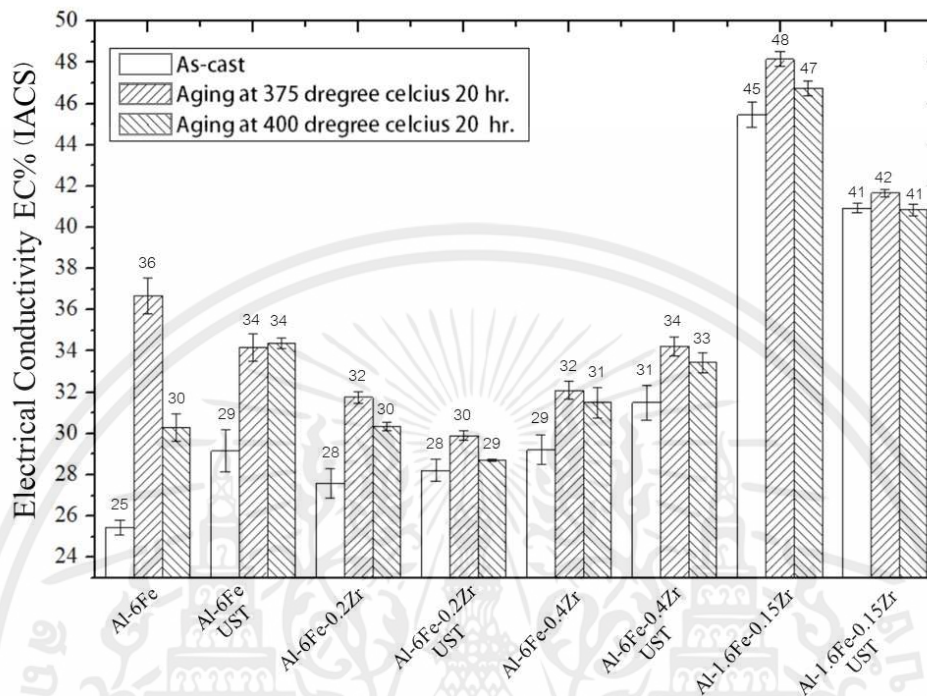
(ง)

รูปที่ 4.20 อิทธิพลของกระบวนการอัลตราโซนิกต่อสมบัติความแข็งของโลหะอลูมิเนียมผสมเหล็กบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ก) Al-6Fe (ข) Al-6Fe-0.2Zr (ค) Al-6Fe-0.4Zr และ (ง) Al-1.6Fe

#### 4.7 สมบัติการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe และ Al-1.6Fe

ผลการศึกษาการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสม ก่อนการบ่มแข็งและหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส ที่ค่าความแข็งสูงสุด 20 ชั่วโมง อลูมิเนียมผสม Al-6Fe ที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากการบ่มที่ไม่ผ่านกระบวนการอัลตราโซนิก ในสภาวะหล่อ (As-Cast Stage) ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ  $Al_3Fe$  ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และเมื่อผ่านการบ่มแข็ง 20 ชั่วโมง มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก ในสภาวะการหล่อ (As-Cast Stage) ในทุกกรณี และในสภาวะอลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก Al-1.6Fe-0.15Zr มีค่าการนำไฟฟ้าสูงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถวัดได้ 48 %IACS ที่อุณหภูมิการบ่มแข็ง 375 องศาเซลเซียส 20 ชั่วโมง โดยไม่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นภายหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียส เป็นผลจากการเกิดการตกผลึกของผลึก  $Al_3Fe$  และ  $Al_3Zr$  ในระดับนาโนในเนื้อพื้นอลูมิเนียมส่งผลให้เกิดนำอิเล็กตรอนได้ดีขึ้นและค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นและจาก

กรณีของอุณหภูมิในการบ่ม 375 องศาเซลเซียสมีค่าการนำไฟฟ้าสูงเป็นผลมาจากการตกผลึกของผลึก  $Al_3Fe$  และ  $Al_3Zr$  ในอุณหภูมิที่เหมาะสม ขณะเดียวกันการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสม



รูปที่ 4.21 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, %IACS) ของอลูมิเนียมผสมชนิด Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr, Al-6Fe-0.4Zr และ Al-1.6Fe-0.15Zr ไม่ผ่านการบ่มแข็ง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียสของอลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการบ่มและบ่มด้วยอัลตราโซนิก

#### 4.8 ความต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe และ Al-1.6Fe

##### 4.8.1 ความต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Techniques)

ในการศึกษาสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่างของอลูมิเนียมผสมชนิด Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr, Al-6Fe-0.4Zr และ Al-1.6Fe-0.15Zr เมื่อบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก และไม่บ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก โดยวิธีการทดสอบ Electrochemical ควบคุมปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดจากการกัดกร่อน

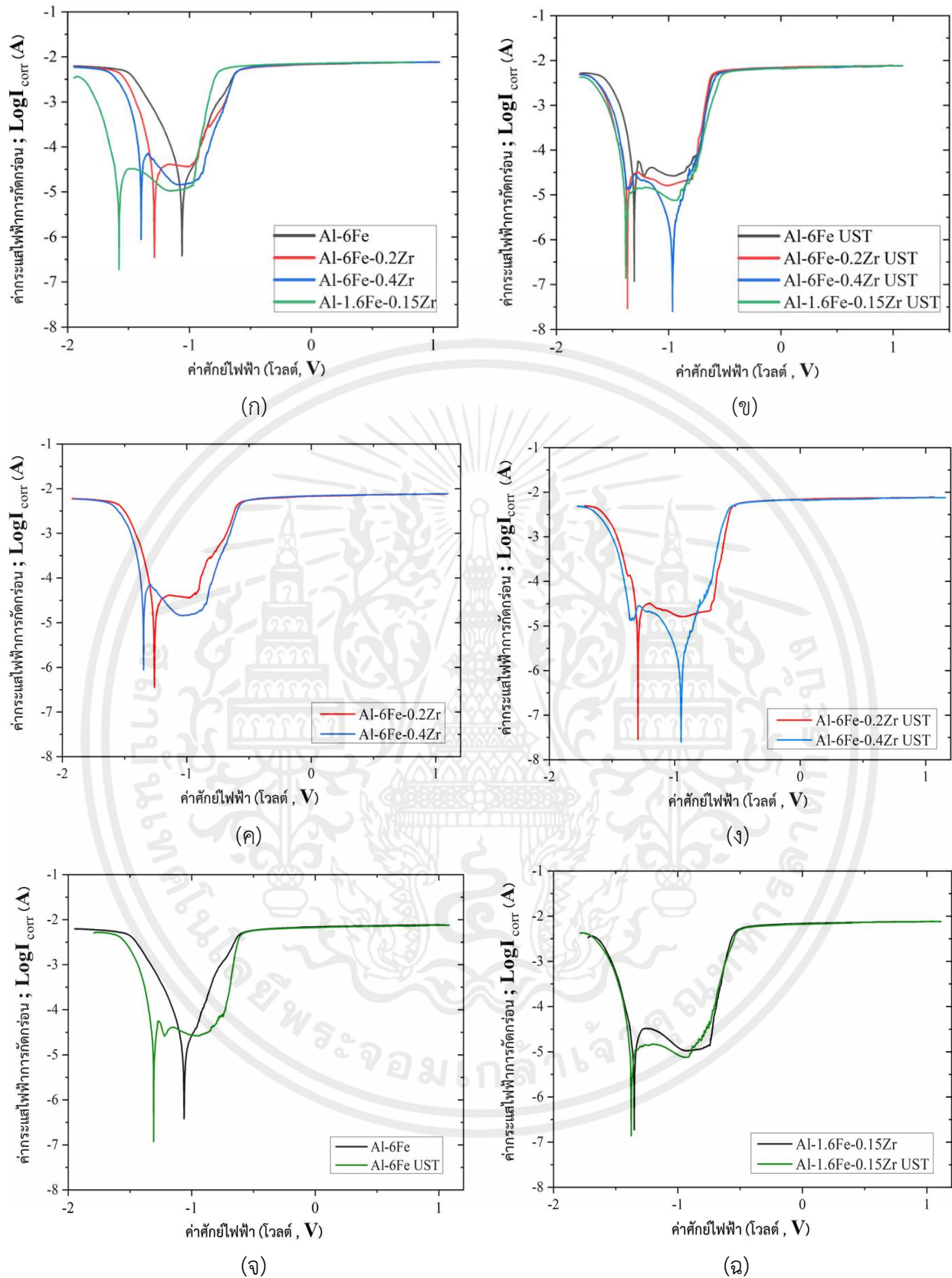
ผลการทดสอบการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe และ Al-1.6Fe-0.15Zr ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) และเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีสำหรับงานวิจัย (Potentiostat/Galvanostat) แสดงผลเป็นกราฟเส้นโค้งโพลลาเซชัน โดยแนวโน้มกราฟที่เกิดขึ้นนำไปสู่การหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) จากจุดตัดของความชันกราฟ

เมื่อพิจารณาอลูมิเนียมผสม Al-6Fe, Al-6Fe-0.2Zr และ Al-6Fe-0.4Zr จากรูปที่ 4.22 (ก) พบว่า อลูมิเนียมผสม Al-6Fe มีค่า  $I_{corr}$  น้อย สอดคล้องกับอัตราการกัดกร่อนต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.2Zr และมีค่า  $E_{corr}$  สูงสุด สอดคล้องกับปฏิกิริยาการกัดกร่อนช้าที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ( $-1.06$  V,  $8.54 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>) ดังแสดงตารางที่ 4.1 นอกจากนี้พบว่า เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในด้านแอโนดิกของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.2Zr ในช่วง  $-1.3$  V ถึง  $-0.9$  V ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าคงที่โดยประมาณ  $1.24 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และมีช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่ในช่วงพลาสซีฟ (Passive Region) ซึ่งเป็นช่วงเกิดการลดของปฏิกิริยาแอโนดิก เป็นผลจากการสร้างชั้นฟิล์มในการซ่อมแซมตัวเองของอลูมิเนียมผสม ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

โดยสามารถอธิบายได้ว่าอลูมิเนียมผสม Al-6Fe เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนช้าและความต้านทานการกัดกร่อนสูงเมื่อเทียบกับอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.2Zr ซึ่งในขณะเดียวกันอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนรวดเร็วและความต้านทานการกัดกร่อนมีค่าน้อยที่สุด และจากการศึกษาอิทธิพลของโลหะแมกนีเซียมในปริมาณการเติมเซอร์โคเนียมมีผลต่อลักษณะการสร้างชั้นฟิล์มในอลูมิเนียมผสม โดยมีส่วนช่วยให้อัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงดังแสดงรูปที่ 4.22 (ก)

เมื่อพิจารณาอลูมิเนียมผสม Al-6Fe และที่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียม 0.2 และ 0.4 wt.% อีกทั้งเมื่อบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ดังแสดงรูปที่ 4.22 (ข)-(ง) พบว่าเมื่อผ่านการบ่ม อลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.2Zr อัตราการกัดกร่อนลดลง แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการกัดกร่อนเร็วขึ้น และอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr อัตราการกัดกร่อนลดลงและปฏิกิริยาการกัดกร่อนช้าลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่าอลูมิเนียมผสม Al-6Fe เมื่อเติมเซอร์โคเนียมในปริมาณที่เหมาะสมมีส่วนช่วยให้อัตราการต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นและเกิดการสร้างชั้นฟิล์มขึ้นเพื่อลดอัตราการกัดกร่อน อีกทั้งเมื่อทำร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ส่งผลให้อัตราความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น โดยพบว่าอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr เมื่อบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดีและเกิดการกัดกร่อนช้าเมื่อเทียบกับอลูมิเนียมผสม Al-6Fe และ Al-6Fe-0.2Zr แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษา Al-6Fe-0.4Zr เมื่อบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกไม่สามารถสังเกตเห็นช่วงการสร้างชั้นฟิล์มได้เช่นเดียวกับอลูมิเนียมผสมชนิดอื่นๆ

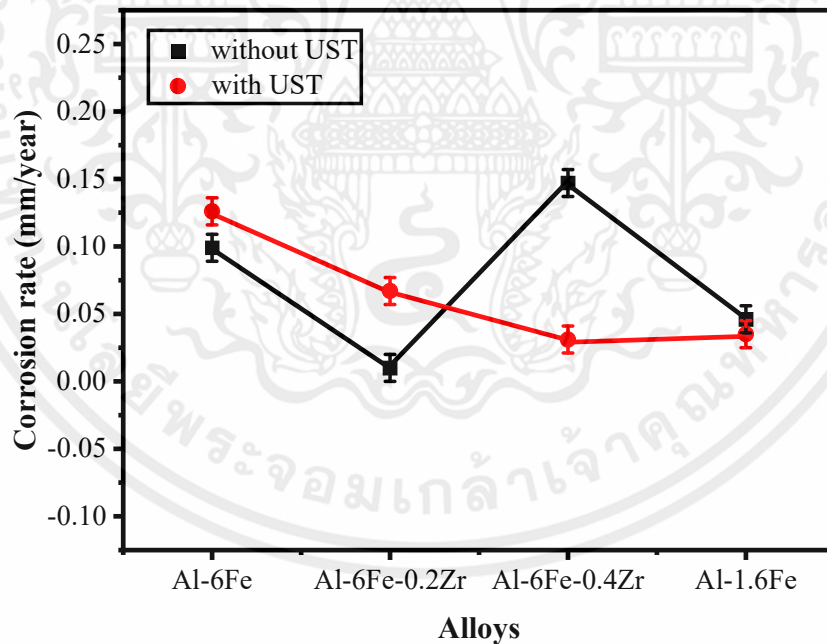


รูปที่ 4.22 เส้นโค้งโพลาริเซชันของอลูมิเนียมผสมเหล็ก (ก) NoUST (ข) UST (ค) Al-6Fe-0.2Zr-NoUST และ Al-6Fe-0.4Zr-NoUST (ง) Al-6Fe-0.2Zr-UST และ Al-6Fe-0.4Zr-UST (จ) Al-6Fe NoUST และ UST (ฉ) Al-1.6Fe-NoUST และ UST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า ( $E_{corr}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) ของอลูมิเนียมผสมเหล็กที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 wt.%

ผลจากเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า	สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 wt.%	
	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
Al-6Fe	-1.06	$8.54 \times 10^{-6}$
Al-6Fe (With UST)	-1.31	$1.14 \times 10^{-5}$
Al-6Fe-0.2Zr	-1.26	$8.59 \times 10^{-6}$
Al-6Fe-0.2Zr (With UST)	-1.29	$5.78 \times 10^{-6}$
Al-6Fe-0.4Zr	-1.34	$1.27 \times 10^{-5}$
Al-6Fe-0.4Zr (With UST)	-0.95	$9.27 \times 10^{-7}$
Al-1.6Fe	-1.35	$3.97 \times 10^{-6}$
Al-1.6Fe (With UST)	-1.37	$3.89 \times 10^{-6}$



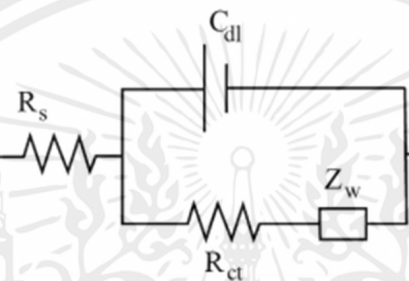
รูปที่ 4.23 อัตราการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมเหล็ก

#### 4.8.2 ความต้านทานเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าในอลูมิเนียมผสม

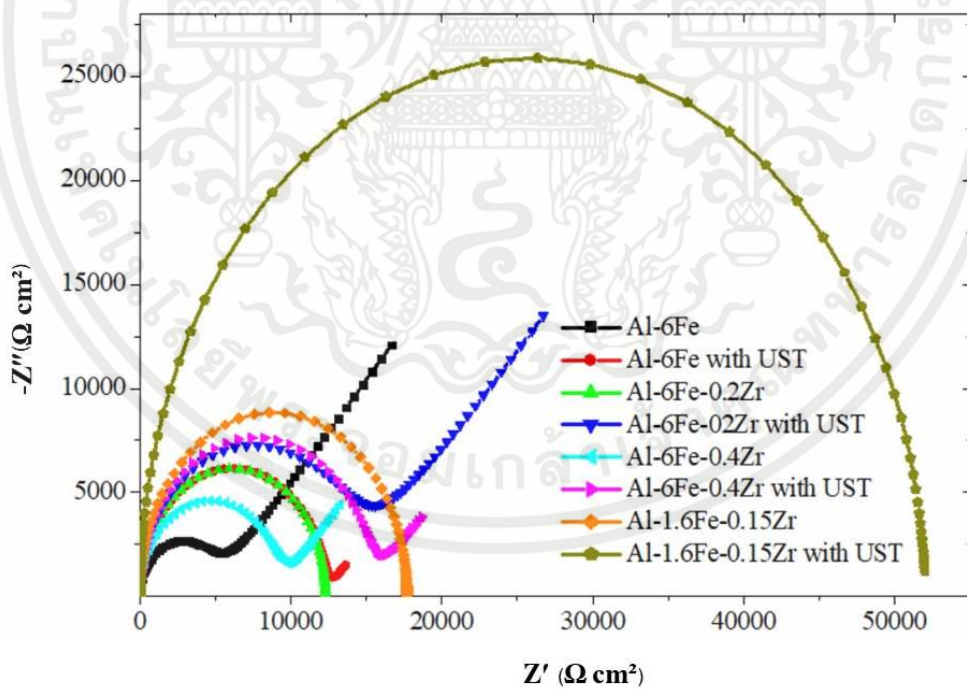
ผลการศึกษาลักษณะการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมโดยเทคนิค EIS อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเชิงเคมีไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสมเพื่อตรวจสอบจลนศาสตร์และกลไกพฤติกรรมการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 wt.% ที่อุณหภูมิห้อง ภายในวงจรสมมูล (ECM) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ส่วนประกอบของตัวต้านทาน  $R_s$  คือ ความต้านทานของสารละลายที่เกี่ยวข้องกับสมบัติปริมาณมากของอิเล็กโทรไลต์อิมพีแดนซ์ของ Warburg ( $Z_w$ )  $R_f$  คือ ตัวต้านทานการถ่ายโอนประจุที่มีการต่อแบบขนานกับ CPE ซึ่งมีความสัมพันธ์กับประจุ ตัวต้านทาน และการเหนี่ยวนำ แทนค่าพฤติกรรมของคาปาซิทีฟ (Capacitive) Cdl ตัวเก็บประจุสองชั้น โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ตามตารางที่ 4.2 และจากรูปที่ 4.25 เส้นโค้งของกราฟ Nyquist แสดงถึงความต้านทานกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่สอดคล้องกับพื้นผิวของอิเล็กโทรด โดยขนาดความโค้งของกราฟที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามกับค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นโค้งขนาดใหญ่ส่งผลให้การสูญเสียหรือการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนในแอโนดและแคโทดเป็นไปได้ยาก มีผลทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

จากการศึกษาพบว่าอลูมิเนียมผสม Al-1.6Fe-0.15Zr เมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก มีเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนโค้งสูงสุด อันเนื่องมาจากขนาดของยูเทคติกเกรนมีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวทั่วทั้งบริเวณพื้นอลูมิเนียมสม่ำเสมอ เป็นผลทำให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุด และจากผลการศึกษาอลูมิเนียมผสมเมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนโค้งของกราฟมีขนาดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากกระบวนการอัลตราโซนิกทำให้ Intermetallic เกิดจากการแตกหักและมีการกระจายตัวทั่วทั้งบริเวณพื้นอลูมิเนียมอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งโลหะแม่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียมที่เหมาะสมของอลูมิเนียมผสมมีผลต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนโค้งของกราฟมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อสังเกตจากอลูมิเนียมผสมที่ไม่มีการเติมโลหะแม่ โดยจากการศึกษาพบว่าโลหะแม่ที่ปริมาณการเติมเซอร์โคเนียม 0.2 wt.% (Al-6Fe-0.2Zr) มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนโค้งของกราฟและค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด ส่งผลให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าโพลาไรซ์ดังแสดงในรูป 4.22 มีเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนโค้งของกราฟสูงกว่าโลหะแม่ในปริมาณการเติมเซอร์โคเนียม 0.4 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ค) เมื่อไม่บ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ซึ่งมีความสอดคล้องกับกราฟเส้นโค้งโพลาเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก)-(ง) สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณการเติมโลหะแม่ที่เหมาะสมมีผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมเพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากโลหะแม่ส่งผลให้ Intermetallic มีจำนวนเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมเซอร์โคเนียมในโลหะแม่ อีกทั้งยังส่งผลให้ขนาด Intermetallic เล็กลง และมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และจากผลการศึกษาเมื่อเติมโลหะแม่ร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกยิ่งส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนโค้งของกราฟมีขนาดเพิ่มมากยิ่งขึ้น อันเนื่องมาจากการเติมโลหะแม่ส่งผลให้ Intermetallic ขนาดเล็กลง

และเมื่อร่วมกับกระบวนการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกยิ่งมีผลต่อการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นอลูมิเนียมผสม เป็นผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนในอลูมิเนียมผสมที่เพิ่มขึ้น โดยอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุดเมื่อเติมโลหะแม่ร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก จากการศึกษาสามารถอธิบายสรุปได้ว่าการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกและปริมาณการเติมโลหะแม่ต่างมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการกัดกร่อนในอลูมิเนียมผสม อย่างไรก็ตามลักษณะของส่วนโค้งกราฟที่แตกต่างกันอาจเป็นผลมาจากความขรุขระของพื้นผิวภายในชิ้นงานตัวอย่าง หรือเกิดขึ้นจากระดับการเกิดออกซิเดชันของอลูมิเนียมผสมที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.24 วงจรสมมูล ECM ของเทคนิค EIS [36]



รูปที่ 4.25 กราฟ Nyquist ของโลหะอลูมิเนียมผสมเหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการบ่มและที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าเคมีอิมพีแดนซ์ Electrochemical-Impedance-Spectroscopy (EIS) ของอลูมิเนียมผสมเหล็ก

พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าเคมีของอลูมิเนียมผสมพารามิเตอร์ Electrochemical-Impedance-Spectroscopy (EIS)			
อลูมิเนียมผสม	$R_s$ ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	$C_{dl}$ ( $\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2$ )	$R_t$ ( $\Omega \text{ cm}^2$ )
Al-6Fe	6.94	4.87	4.75
Al-6Fe with UST	11.3	5.35	12.2
Al-6Fe-0.2Zr	18.8	2.87	12.3
Al-6Fe-0.2Zr with UST	15.0	4.53	13.6
Al-6Fe-0.4Zr	14.6	5.59	8.95
Al-6Fe-0.4Zr with UST	14.8	5.08	15.0
Al-1.6Fe-0.15Zr	15.4	2.80	17.7
Al-1.5Fe-0.15Zr with UST	27.6	5.95	51.8



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปของผลการทดลอง และข้อเสนอแนะของผลการศึกษาการพัฒนาโลหะอลูมิเนียมผสมเหล็ก โดยการเติมโลหะแม่ อลูมิเนียม เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม และ กระบวนการ อัลตราโซนิก ที่มีผลต่อสมบัติทางกล การต้านทานการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้า ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็ก ด้วยการเติมโลหะแม่อลูมิเนียม เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม และกระบวนการอัลตราโซนิก เนื่องจากในปัจจุบันโลหะอลูมิเนียมผสม มีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีหลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติที่ดี อาทิ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง การนำไฟฟ้าและการทนกัดกร่อนได้ดี ซึ่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกศึกษาการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็ก เนื่องจากเป็นอลูมิเนียมผสมเกรดใหม่ที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก และมีสมบัติเชิงกล การทนการกัดกร่อนที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมโลหะแม่อลูมิเนียม เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม ในโลหะอลูมิเนียมผสมจะช่วยให้วัสดุมีโครงสร้างที่ละเอียดขึ้น สมบัติเชิงกลที่เพิ่มมากขึ้น ทนการกัดกร่อนได้มากขึ้น และเมื่อใช้ร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ส่งผลให้โครงสร้างมีความละเอียดและมีการกระจายตัวได้ดีมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยจากที่กล่าวมาข้างต้นทางผู้จัดทำได้เลือกศึกษาพฤติกรรมของโลหะแม่ต่ออลูมิเนียมผสมเหล็กในปริมาณการเติม 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์เซอร์โคเนียม โดยน้ำหนัก ร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก

จากการศึกษาโลหะอลูมิเนียมผสมเหล็ก 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Al-6Fe) พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคประกอบไปด้วย สารประกอบเชิงโลหะอลูมิเนียม-เหล็ก (Primary  $Al_3Fe$ ) และโครงสร้างยูเทคติกของอลูมิเนียมผสมเหล็ก ผ่านการบ่มด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในอลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนการแข็งตัวของน้ำโลหะ ส่งผลให้โครงสร้างมีความละเอียดและการกระจายตัวดีขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติทางกล การทนการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อีกทั้งจากการเติมโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ในปริมาณการเติม 0.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์เซอร์โคเนียมโดยน้ำหนักลงในอลูมิเนียมผสมเหล็กทำให้เกิดการก่อตัวขึ้น ของ Primary  $Al_3Zr$  ซึ่งช่วยในการปรับสภาพของอนุภาคผ่านการสร้างนิวเคลียส และการเติมธาตุไทเทเนียมปริมาณเล็กน้อยสามารถส่งเสริมการเกิด Primary  $Al_3Zr$  เพิ่มมากขึ้นจากการที่เฟสยูเทคติกถูกลดจำนวนลง และเมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของเกรนให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของ Intermetallic สารประกอบเชิงโลหะยังไม่ดีเท่าที่ควร และเมื่อใช้ร่วมกับการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก

โครงสร้างมีความละเอียดมากยิ่งขึ้นและการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้สมบัติความแข็ง การทนการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

ผลจากการปรับสภาพโครงสร้างทางจุลภาคละเอียดนั้นมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลเช่น สมบัติความแข็ง การต้านทานการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยจากการทดสอบความแข็งของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียสในระยะเวลา 30 ชั่วโมง พบว่าเมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส เติมโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ที่ความเข้มข้นเซอร์โคเนียม 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก มีผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุด เนื่องจากผลึกของ  $Al_3Zr$  เกิดการตกตะกอนขณะทำการบ่มแข็ง และเมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกทำให้โครงสร้างทางจุลภาคมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้สมบัติความแข็งมีค่าสูงขึ้น จากผลการทดสอบการทนการกัดกร่อน พบว่าอลูมิเนียมผสม Al-6Fe เมื่อผ่านการเติมโลหะแม่ Al-8Zr-1.6Ti ในปริมาณที่เหมาะสมมีส่วนช่วยในการทนการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น จากการสร้างชั้นฟิล์มขึ้นเพื่อลดอัตราการกัดกร่อนในลักษณะที่แตกต่างกัน และเมื่อผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิก ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนมีปริมาณลดลงมากยิ่งขึ้น โดยอลูมิเนียมผสม Al-6Fe-0.4Zr ที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนดีที่สุดเมื่อเทียบกับอลูมิเนียมผสม Al-6Fe และ Al-6Fe-0.2Zr แต่ไม่สังเกตพบช่วงการสร้างชั้นฟิล์มเช่นเดียวกับเหมือนกับ Al-6Fe-0.2Zr และจากผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสม Al-6Fe เมื่อผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 20 ชั่วโมง การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากในสภาวะการหล่อ (As-Cast Stage) ในทุกกรณี คาดว่าเป็นการตกผลึกในระดับนาโนของผลึก  $Al_3Fe$  และ  $Al_3Zr$  ในอุณหภูมิการบ่มแข็งที่เหมาะสม แต่ถึงอย่างไรก็ตามการบ่มด้วยอัลตราโซนิกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมผสม

และจากการศึกษาโลหะอลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติกเหล็ก 1.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Al-1.6Fe-0.15Zr) พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคประกอบไปด้วยเนื้อพื้นอลูมิเนียม และเฟสยูเทคติก Al+ $Al_3Fe$  จากผลการบ่มด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างเกรนมีขนาดเล็กลง มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลและการทนการกัดกร่อนเพิ่มสูง นอกจากนี้ผลจากการบ่มแข็งอุณหภูมิ 375 และ 400 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งและการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามการบ่มด้วยอัลตราโซนิกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของอลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติกเหล็ก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กด้วยการเติมโลหะแม่และกระบวนการอัลตราโซนิก ฉบับนี้เป็นการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเกรดใหม่ Al-6Fe โดยการปรับสภาพเกรนละเอียดเพื่อให้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนมากขึ้น โดยการใช้กระบวนการอัลตราโซนิกและการเติมโลหะแม่ Al-Zr-Ti หากต้องการพัฒนาอลูมิเนียมผสมด้วยวิธีอื่นๆ อาจต้องศึกษาถึงผลกระทบด้านโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติเชิงกล การนำไฟฟ้า ความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และความสามารถในการขึ้นรูป เพื่อให้สามารถพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กที่สามารถตอบโจทย์กับความต้องการในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

การทดสอบโลหะผสมด้านโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล การนำไฟฟ้า และการทน การกัดกร่อน เป็นการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากเข้าหล่อเดียวกัน ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการบ่มด้วยกระบวนการทำอัลตราโซนิก การกระจายตัวของคลิ่นอัลตราโซนิกอาจไม่ครอบคลุมทั่วบริเวณภายในเข้าหล่อ มีผลต่อการกระจายตัวของโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกล และข้อบกพร่องที่เกิดจากการหล่อ ทำให้ต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่หลีกเลี่ยงบริเวณที่เกิดข้อบกพร่อง ในแต่ละบริเวณที่แตกต่างกันแต่อยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งหากสามารถทดสอบชิ้นงานตัวอย่างที่มีจากตำแหน่งชิ้นงานในบริเวณใกล้เคียงกันและเกิดข้อบกพร่องในการหล่อเพียงเล็กน้อยอาจช่วยในการสนับสนุนข้อสรุปที่มีให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Zaid, A. I. O., & Al-Qawabah, S. M. A. (2010). Effect of Zr Addition on the Mechanical Behavior, Ductility and Wear Resistance of Aluminum Grain Refined by Titanium. Key Engineering Materials, 442, 15–25.
- [2] Niu, X. P., Froyen, L., Delaey, L., & Peytour, C. (1994). Effect of Fe content on the mechanical Alloying and mechanical properties of Al-Fe Alloys. Journal of Materials Science, 29(14), 3724–3732.
- [3] Zhang, L., Eskin, D. G., & Katgerman, L. (2011). Influence of ultrasonic melt treatment on the formation of primary intermetallics and related grain refinement in aluminum Alloys. Journal of Materials Science, 46(15), 5252–5259.
- [4] N.A. Belov, A.A. Aksenov, Dmitry G. Eskin. (2002). Iron Phase Diagrams of Iron-Containing Aluminum Alloys. Iron in Aluminium Alloys, 4(1), 3-7.
- [5] <https://apnews.com/press-release/business-wire/technology-business-c71afe9768484a9cb03ae6f049111387>. (มกราคม, 2565)
- [6] Somboon Otarawanna A. K, Dahle A. K. Dahle. (2011). Casting of aluminium Alloys. Fundamentals of aluminum metallurgy Chapter: 6.R.N. Lumley
- [7] Ribeiro, P. L., Silva, B. L., Silva, W. S. da, & Spinelli, J. E. (2014). Effects of cellular growth on fatigue life of directionally solidified hypoeutectic Al-Fe Alloys. Materials Research, 17(3), 767–774.
- [8] Hou, J. P., Li, R., Wu, X. M., Yu, H. Y., Zhang, Z. J., Chen, Q. Y., Zhang, Z. F. (2018). Microstructure evolution and strength degradation mechanisms of high-strength Al-Fe wire. Journal of Materials Science.
- [9] Cubero-Sesin, J. M., & Horita, Z. (2012). Strengthening of Al through addition of Fe and by processing with high-pressure torsion. Journal of Materials Science, 48(13), 4713–4722.
- [10] Cubero-Sesin, Jorge M.; Arita, Makoto; Horita, Zenji (2015). High Strength and Electrical Conductivity of Al-Fe Alloys Produced by Synergistic Combination of High-Pressure Torsion and Aging. Advanced Engineering Materials, 17(12), 1792–1803.
- [11] Lei Li, Yudong Zhang, Yudong Zhang, Claude Esling. (2012). Influence of a high magnetic field on the precipitation behavior of the primary Al<sub>3</sub>Fe phase during the

- solidification of a hypereutectic Al-3.31 wt% Fe Alloy. Journal of Crystal Growth, 339(1), 61–69.
- [12] Asiful H. Seikh 1, Muneer Baig 2, Jitendra Kumar Singh. (2019). Microstructural and Corrosion Characteristics of Al-Fe Alloys Produced by High-Frequency Induction-Sintering Process. Coatings 9, 686(10), 1-18.
- [13] Fangwei, JinXueying Ji. (2021). Influence of a High Static Magnetic Field on the Morphology of Primary Al 3 Fe Phase in Al-3%Fe Alloy. Journal of Physics Conference Series, 2101(1), 1742-6596.
- [14] Chen, Z., & Yan, K. (2020). Grain refinement of commercially pure aluminum with addition of Ti and Zr elements based on crystallography orientation. Scientific Reports, 10(1).
- [15] Dmitry G. Eskin. (2020). Ultrasonic processing of aluminium Alloys above the liquidus: the role of Zr. MATEC Web of Conferences 326:06002.
- [16] Atamanenko, T. V., Eskin, D. G., Zhang, L., & Katgerman, L. (2010). Criteria of Grain Refinement Induced by Ultrasonic Melt Treatment of Aluminum Alloys Containing Zr and Ti. Metallurgical and Materials Transactions A, 41(8), 2056–2066.
- [17] Aynalem, G. F. (2020). Processing Methods and Mechanical Properties of Aluminums Matrix Composites. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 1–19.
- [18] D.G. Eskin, I. Tzanakisb. (2018). Fundamental studies of ultrasonic melt processing. Ultrasonics Sonochemistry 52.
- [19] V.M. SREEKUMAR and D.G. ESKIN. (2016). A New Al-Zr-Ti Master Alloy for Ultrasonic Grain Refinement of Wrought and Foundry Aluminum Alloys. Metals & Materials Society 68(12).
- [20] [http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=42&id=139](http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=139). (ธันวาคม, 2564)
- [21] <https://www.slri.or.th/bdd/thx-ray-diffractometer-xrd.html>. (ธันวาคม, 2564)
- [22] [http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=42&id=39](http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=39). (ธันวาคม, 2564)
- [23] [http://www.electron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2966&Itemid=5&limit=1&limitstart=66](http://www.electron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=2966&Itemid=5&limit=1&limitstart=66). (ธันวาคม, 2564)
- [24] <http://pirun.ku.ac.th/~fengpppa/02206381/hardness.pdf>. (ธันวาคม, 2564)
- [25] [http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement\\_Of\\_Hardness.html](http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html). (ธันวาคม, 2564)

- [26] <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7182-2017-06-05-14-44-28>. (ธันวาคม, 2564)
- [27] <https://www.corrosionpedia.com/corrosion-assessment-8-corrosion-tests-that-help-engineers-mitigate-corrosion/2/1389>. (ธันวาคม, 2564)
- [28] <http://www.dms.eng.su.ac.th/filebox/FileData/MPM053.pdf>. (ธันวาคม, 2564)
- [29] <https://www.ponpe.com/tech/716-ultrasonic-thickness-gauge.html>. (ธันวาคม, 2564)
- [30] <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/3/science/physics/index2.htm>. (ธันวาคม, 2564)
- [31] [https://hmong.in.th/wiki/Electrical\\_conductivity](https://hmong.in.th/wiki/Electrical_conductivity). (ธันวาคม, 2564)
- [32] [https://il.mahidol.ac.th/e-media/electromagnetism/sub\\_lesson/.htm](https://il.mahidol.ac.th/e-media/electromagnetism/sub_lesson/.htm). (ธันวาคม, 2564)
- [33] <https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/table.pdf>. (ธันวาคม, 2564)
- [34] Rifai, D., Abdalla, A., Ali, K., & Razali, R. (2016). Giant Magnetoresistance Sensors: A Review on Structures and Non-Destructive Eddy Current Testing Applications. *Sensors*, 16(3), 298.
- [35] <http://thai.ndttester.com/sale-13807433-60khz-electromagnetic-eddy-current-conductivity-meter.html>. (มกราคม, 2565)
- [36] Daobing Xu, Wei Long, Xiaoping Zhou. (2020). Microstructure and corrosion resistance of Al<sub>3</sub>(Zr, Ti)/Al composite prepared by powder metallurgy. *Advanced Composites Letters Volume 29*: 1–9.
- [37] Kori, S.A., S. Murty, and M. Chakraborty, 1999, “Influence of Silicon and Magnesium on Grain Refinement in Aluminium Alloys.”. *Materials Science and Technology*, Vol. 15, No. 9, pp. 986-992.
- [38] Pedro Henrique Lamarão Souzaa, José Maria do Vale Quaresma. (2017). Precipitation Evolution and Modeling of Growth Kinetics of L12 -structured Al<sub>3</sub>Zr Particles in Al-0.22Zr and Al-0.32Zr (wt.%) Alloys Isothermally Aged. *Materials Research*. 66075-110.
- [39] Knipling, K. E., Dunand, D. C., & Seidman, D. N. (2008). Precipitation evolution in Al–Zr and Al–Zr–Ti Alloys during isothermal aging at 375–425°C. *Acta Material*, 56(1), 114–127.
- [40] Yuan Liang. (2016). An Investigation on the Optimum Aging Condition for HFO-processed AA6082 Aluminium Alloy. MSc by research.

[41] file:///C:/Users/os/Downloads/jitkhot,+%23%23default.groups.name.manager%23%23,+9.%E0%B8%9E%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%94%E0%B8%B2).pdf



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้