

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-Zn-Mg-Cu) ภายหลังจาก  
แข็งตัวและภายหลังกระบวนการอบเป็นเนื้อเดียวที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการ Direct Chill  
ภายใต้การกวนของแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ

นายปราโมทย์ ธีรทีปวิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2551  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOLIDIFIED AND HOMOGENIZED MICROSTRUCTURES OF SUPER HIGH STRENGTH  
Al-Zn-Mg-Cu ALLOYS CAST BY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETICALLY  
STIRRED DIRECT CHILL METHOD

Mr.Pramote Thirathipviwat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University



ปราโมทย์ ธีรที่ปวิวัฒน์ : โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-Zn-Mg-Cu) ภายหลังจากแข็งตัวและภายหลังจากกระบวนการอบเป็นเนื้อเดียวที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการ Direct Chill ภายใต้อุณหภูมิของแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ. (SOLIDIFIED AND HOMOGENIZED MICROSTRUCTURES OF SUPER HIGH STRENGTH Al-Zn-Mg-Cu ALLOYS CAST BY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETICALLY STIRRED DIRECT CHILL METHOD.) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : Prof. Takateru Umeda, D.Eng., 90 หน้า.

โลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ที่หล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC) ที่มีปริมาณของธาตุผสมคือสังกะสี 6.0 - 10.0 wt %, แมกนีเซียม 1.0 – 3.0 wt % และทองแดง 1.0 – 2.3 wt % ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายหลังจากการแข็งตัวและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว ซึ่งเฟสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยายูเทคติกมีลักษณะเป็นโครงสร้าง lamellar อยู่บริเวณขอบเกรน ในการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อพบว่าปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกลดลงตามปริมาณของธาตุผสม โดยเฉพาะธาตุแมกนีเซียมมีผลต่อปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกมากกว่าธาตุสังกะสีและทองแดง โดยมีเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ที่มีทองแดงละลายอยู่เป็นเฟสหลัก นอกจากนี้ยังพบเฟส S ( $Al_2CuMg$ ),  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ),  $Al_7Cu_2Fe$ , T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ),  $Mg_2Si$  และ  $Al_3Zr$  โดยเฟสที่พบภายในโครงสร้างมีผลมาจากส่วนประกอบทางเคมีของธาตุผสมในโลหะผสมอะลูมิเนียม และลำดับการเกิดเฟสของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิค LFEC ได้แก่  $Al_3Zr$ , Al ( $\alpha$ ),  $Al_7Cu_2Fe$ ,  $MgZn_2$ , S ( $Al_2CuMg$ ), T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) และ  $Mg_2Si + \theta$  ( $Al_2Cu$ ) ตามลำดับ

การศึกษการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกลดลงตามระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว และโครงสร้างไม่เชื่อมต่อกัน โดยเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ละลายเข้าสู่เนื้อพื้นของโลหะผสมอะลูมิเนียมระหว่างกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว เฟส  $Al_7Cu_2Fe$  และ S ( $Al_2CuMg$ ) ยังคงถูกพบในโครงสร้างภายหลังจากกระบวนการหล่อ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 4970783121 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD : SUPER HIGH STRENGTH ALUMINIUM ALLOY / MICROSTRUCTURE /  
HOMOGENIZATION / SOLIDIFICATION

PRAMOTE THIRATHIPVIWAT: SOLIDIFIED AND HOMOGENIZED  
MICROSTRUCTURES OF SUPER HIGH STRENGTH Al-Zn-Mg-Cu ALLOYS CAST  
BY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETICALLY STIRRED DIRECT CHILL  
METHOD. THESIS PRINCIPLE ADVISOR: MAWIN SUPRADIST NA AYUDHAYA,  
Ph.D., THESIS COADVISOR: PROF. TAKATERU UMEDA, D.Eng., 90 pp.

Solidified and homogenized microstructures of super high strength aluminium Al-Zn-Mg-Cu alloys produced by low frequency electromagnetic casting (LFEC) were studied in composition range of Zn; 6.0-10.0%, Mg; 1.0-2.5%, Cu; 1.0-2.3%. Many phases were found along grain boundaries after solidification, which were formed mostly by eutectic reaction. The amount of eutectic structures decreased with the reduction of alloying elements content, especially Mg, having more effect on the amount of eutectic structures than those of Zn and Cu.  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) included with Cu is a major eutectic phase. Besides, the other secondary phases were discovered such as S ( $Al_2CuMg$ ),  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ),  $Al_7Cu_2Fe$ , T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ),  $Mg_2Si$  and  $Al_3Zr$ . These constituents changed with alloying elements content. Solidification sequence of Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu cast by LFEC was determined as follows;  $Al_3Zr$ , Al ( $\alpha$ ),  $Al_7Cu_2Fe$ ,  $MgZn_2$ , S ( $Al_2CuMg$ ), T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) and  $Mg_2Si + \theta$  ( $Al_2Cu$ ), respectively.

The homogenized microstructure evolution at 460 °C was studied, the amount of eutectic structures were reduced with increasing homogenization time and the eutectic structures were less connected as the network.  $MgZn_2$  is dissolved into the matrix aluminium phase during homogenization. However,  $Al_7Cu_2Fe$  and S ( $Al_2CuMg$ ) remained in homogenized alloys.

Department: .....Metallurgical Engineering...Student's signature: .....

Field of study: ...Metallurgical Engineering...Principle advisor's signature: .....

Academic year: ..... 2008.....Co-advisor's signature: .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือจาก Prof. Dr. Takateru Umeda และอาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการศึกษาและวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษาด้านจิตใจ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, อาจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และ ดร.กฤษดา ประภากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบริษัท Nippon Light Metal Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น สำหรับความอนุเคราะห์ให้ชิ้นงานในการศึกษาและวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Electron Probe Microscope Analyzer (EPMA) ในการตรวจสอบและวิเคราะห์เฟสภายในชิ้นงาน รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ สำหรับคำปรึกษาด้านการใช้เครื่องมือ และคุณโศภิต พุ่มพวง พนักงานประจำภาควิชาธรณีวิทยา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ในงานด้านโลหะวิทยา ต่างๆ เจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน และเพื่อนในกลุ่มวิจัยการแข็งตัวของน้ำโลหะ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและบุคคลอันเป็นที่เคารพรักที่คอยให้กำลังใจอีกทั้งการสนับสนุนในด้านการศึกษา และให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม.....	5
2.1.2 ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	6
2.1.3 โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX.....	8
2.1.4 แผนภูมิสมดุลที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	26
3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย.....	26
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	27
4 ผลการวิเคราะห์การทดลอง.....	34
4.1 โครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อ.....	34
4.1.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการหล่อ.....	34

4.1.1.1 โครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการหล่อ.....	34
4.1.1.2 ขนาดเกรนภายหลังกระบวนการหล่อ.....	38
4.1.1.3 ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายหลังกระบวนการหล่อ.....	39
4.1.2 การศึกษาเฟสทุติยภูมิภายในโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อ.....	41
4.1.2.1 X-Ray Diffractometer (XRD).....	42
4.1.2.2 Electron Probe Microscope Analyzer (EPMA) .....	45
4.2 โครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	52
4.2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการ การอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	52
4.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบภายในโครงสร้างภาย หลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	58
4.3 การวิเคราะห์ลำดับการเกิดเฟส.....	67
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะอะลูมิเนียม	5
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียม	6
ตารางที่ 2.3 แสดงรหัสของกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็น	6
ตารางที่ 2.4 แสดงรหัสของกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อหลอม	7
ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการหล่อด้วยเทคนิค LFEC	27
ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ศึกษาจำนวน 7 ชนิด	27
ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน	38
ตารางที่ 4.2 ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน	40
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมของเฟสชนิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของเฟสภายในโครงสร้าง	42
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาทีที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน	56
ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างแสดงปริมาณธาตุผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน	82
ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างแสดงคุณสมบัติทางกลและลักษณะการใช้งานของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน	86
ตารางที่ ข.1 ค่าวิกฤตบีน (t) ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างองศาความอิสระกับช่วงความมั่นใจของข้อมูล	88

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-Zn-Mg-Cu (a) โครงสร้างยูเทคติก (b) ลักษณะของเฟสเหล็ก (Fe-bearing phase).....	9
ภาพที่ 2.2	X-ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.31Zn-2.33Mg-1.7Cu ภายหลังจากกระบวนการหล่อ และภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (ระยะเวลา 6 ชั่วโมง).....	9
ภาพที่ 2.3	การเปลี่ยนแปลงของเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-Zn-Mg-Cu ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C เป็นระยะเวลา (a) 5 นาที, (b) 30 นาที, (c) 6 ชั่วโมง และ (d) 24 ชั่วโมง .....	10
ภาพที่ 2.4	แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Zn-Mg แบบ Liquidus Projection .....	12
ภาพที่ 2.5	แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Zn-Mg แบบ Isothermal Section ที่อุณหภูมิ 335 °C .....	13
ภาพที่ 2.6	แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Mg-Cu แบบ Liquidus Projection.....	14
ภาพที่ 2.7	แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Mg-Cu แบบ Isothermal Section ที่อุณหภูมิ 400 °C .....	14
ภาพที่ 2.8	แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Cu-Zn แบบ Liquidus Projection .....	15
ภาพที่ 2.9	แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Cu-Zn แบบ Isothermal Section ที่อุณหภูมิ 200 °C .....	15
ภาพที่ 2.10	แบบจำลองการหล่อแบบกึ่งต่อเนื่องเทคนิค (a) DC (b) LFEC .....	17
ภาพที่ 2.11	แบบจำลองแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของชิ้นงานหลังการหล่อด้วยเทคนิค (a) DC (b) LFEC .....	17
ภาพที่ 2.12	พื้นผิวของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค (a) DC และ (b) LFEC .....	18
ภาพที่ 2.13	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค (a) DC และ (b) LFEC.....	18
ภาพที่ 2.14	แสดงความแตกต่างของการเกิดรอยร้าวในชิ้นงานของการหล่อด้วยเทคนิค (a) DC และ (b) LFEC.....	19
ภาพที่ 2.15	อุณหภูมิภายในชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค DC และ LFEC .....	19

ภาพที่ 2.16	แสดง sump depth ของเทคนิคการหล่อ DC และ LFEC .....	20
ภาพที่ 2.17	โครงสร้างยูเทคติกบริเวณขอบเกรนของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค (a,b) DC และ (c,d) LFEC.....	20
ภาพที่ 2.18	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Al-Zn-Mg-Cu-Zr จุดที่ 1 และ 2 คือ เฟส T (Al-Zn-Mg-Zn), จุดที่ 3 คือ เฟส $\theta$ ( $Al_2Cu$ ) และจุดที่ 4 และ 5 คือ โครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วย Al และ T (Al-Zn-Mg-Zn).....	21
ภาพที่ 2.19	โครงสร้างจุลภาคหลังจากการหล่อ โดยจุด a คือ สารประกอบกลุ่ม Al-Cu-Fe และจุด b คือ สารประกอบกลุ่ม Al-Mg-Zn-Cu .....	22
ภาพที่ 2.20	โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) จุด a คือ สารประกอบ $Al_7Cu_2Fe$ และจุด b คือ สารประกอบกลุ่ม Al-Mg-Zn-Cu.....	22
ภาพที่ 2.21	a) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม b) ลักษณะของเฟส T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) ที่แยกตัวออกมาจากโครงสร้างยูเทคติก และ c) line scan ของทองแดง.....	23
ภาพที่ 2.22	a) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม b) ลักษณะของสารประกอบ S ( $Al_2CuMg$ ) ที่แยกตัวออกมาจากโครงสร้างยูเทคติก และ c,d) line scan ของ Mg, Cu และ Zn.....	24
ภาพที่ 3.1	ตัวอย่างการวัดขนาดเกรนแบบเส้นตรง.....	30
ภาพที่ 3.2	การกำหนดจุดของแผนภาพที่ใช้ในการวัดปริมาณของโครงสร้างยูเทคติก.....	31
ภาพที่ 3.3	ตัวอย่างการแสดงการตรวจวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติก.....	31
ภาพที่ 3.4	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการทำงานของเครื่อง วิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุ (Differential Thermal Analyzer, DTA).....	33
ภาพที่ 3.5	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของวิธีการ Interrupt solidification .....	33
ภาพที่ 4.1	โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง.....	35
ภาพที่ 4.2	Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการ หล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน.....	36

ภาพที่ 4.3	Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงแสดงโครงสร้างจุลภาค ภายหลังกระบวนการหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมี แตกต่างกัน.....	37
ภาพที่ 4.4	แผนภูมิเปรียบเทียบขนาดเกรนภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน.....	39
ภาพที่ 4.5	แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของ โลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อที่มีส่วนประกอบทางเคมี แตกต่างกัน.....	40
ภาพที่ 4.6	X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มี ส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันภายหลังกระบวนการหล่อ.....	43
ภาพที่ 4.7	การเปรียบเทียบปริมาณของเฟส $\eta$ ( $MgZn_2$ ) เชิงคุณภาพของโลหะผสม อะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมี (สังกะสี, ทองแดง และแมกนีเซียม) แตกต่างกัน.....	44
ภาพที่ 4.8	X-Ray Maps ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu .....	45
ภาพที่ 4.9	Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis โครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu .....	46
ภาพที่ 4.10	X-Ray Maps โครงสร้างยูเทคติกที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu.....	46
ภาพที่ 4.11	Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis เฟส $Al_7Cu_2Fe$ ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu.....	47
ภาพที่ 4.12	(a) Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis ของเฟส $Al_3Zr$ และ (b) X-Ray Maps ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu .....	49
ภาพที่ 4.13	(a) Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis ของเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) และ (b) X-Ray Maps ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu .....	50
ภาพที่ 4.14	โครงสร้าง Lamellar ที่ประกอบด้วยเฟส $\eta$ ( $MgZn_2$ ) และ T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) ของ โลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu (b) โครงสร้างยูเทคติกที่ใช้ในการ ตรวจสอบด้วยวิธี Mapping .....	51

ภาพที่ 4.15 X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0 Mg-1.4Cu.....	51
ภาพที่ 4.16 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลัง กระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที.....	53
ภาพที่ 4.17 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลัง กระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1. เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที.....	53
ภาพที่ 4.18 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลัง กระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.0Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที.....	54
ภาพที่ 4.19 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลัง กระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.5Mg-2.3Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที.....	54
ภาพที่ 4.20 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลัง กระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.0Mg-2.3Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที.....	55
ภาพที่ 4.21 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลัง กระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที.....	55

ภาพที่ 4.22 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลัง กระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที.....	56
ภาพที่ 4.23 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสม อะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที ที่มี ส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน.....	57
ภาพที่ 4.24 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	58
ภาพที่ 4.25 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.5Cu ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	59
ภาพที่ 4.26 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.0Cu ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	59
ภาพที่ 4.27 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.5Mg-2.3Cu ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	60
ภาพที่ 4.28 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.0Mg-2.3Cu ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	60
ภาพที่ 4.29 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	61
ภาพที่ 4.30 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	61
ภาพที่ 4.31 การเปรียบเทียบปริมาณของเฟส $\eta$ ( $MgZn_2$ ) เซึ่งคุณภาพของโลหะผสมอะลูมิเนียม เมื่อระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวแตกต่างกัน.....	62
ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบ X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม a) ภายหลังกระบวนการหล่อ b) ภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็น ระยะเวลา 600 นาที.....	63

ภาพที่ 4.33 a) Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์เฟสด้วยวิธี Spot Analysis b) X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที.....	64
ภาพที่ 4.34 X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu ภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที.....	65
ภาพที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุต่าง ๆ ในอะลูมิเนียมกับอุณหภูมิในช่วงของการแพร่.....	66
ภาพที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ด้วยเครื่องมือ DTA.....	67
ภาพที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนช่วงการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ด้วยเครื่องมือ DTA.....	68
ภาพที่ 4.38 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 590 °C.....	68
ภาพที่ 4.39 a) Secondary Electron Image, b) Backscattered Electron Image c) X-Ray Maps ของเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 515 °C.....	69
ภาพที่ 4.40 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 515 °C.....	70
ภาพที่ 4.41 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 และ 450 °C.....	71
ภาพที่ 4.42 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 450 °C.....	71
ภาพที่ 4.43 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 °C.....	72
ภาพที่ 4.44 a) Backscattered Electron Image b) X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 °C.....	72

ภาพที่ 4.45 X-Ray Maps ของเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 °C.....	73
ภาพที่ 4.46 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคของ โลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่อุณหภูมิ a) 590 °C, b) 515 °C, c) 450 °C และ d) 400 °C.....	74
ภาพที่ 4.47 ลำดับการเกิดเฟสจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Thermal Calc คำนวณจากสมการ Scheil's Equation.....	75
ภาพที่ ข.1 ตัวอย่างกราฟการกระจายแบบ t ที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 10.....	87



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะอะลูมิเนียมมีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Strength to weight ratio) สูง จึงทำให้โลหะอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่น่าสนใจในการนำไปใช้เป็นวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างแทนเหล็กที่มีน้ำหนักมาก โดยความหนาแน่นของโลหะอะลูมิเนียมต่ำกว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า แต่ความแข็งแรงของโลหะอะลูมิเนียมยังไม่สูงพอเมื่อเทียบกับเหล็ก จึงทำให้มีข้อจำกัดด้านการใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมเพื่อให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นหรือพัฒนาสมบัติด้านอื่น ๆ ตามประเภทของการใช้งานโลหะอะลูมิเนียม โดยอาจมีการเติมธาตุผสมต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมให้ดีขึ้น ซึ่งโลหะอะลูมิเนียมที่ถูกเติมธาตุผสมต่าง ๆ ทำให้สมบัติที่แตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของธาตุผสมที่ถูกเติม และถูกนำไปใช้งานแตกต่างกัน นอกจากการเติมธาตุผสมแล้วยังมีกรรมวิธีอื่นที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมได้อีกด้วย เช่น กรรมวิธีการอบชุบแข็งด้วยความร้อน (Heat treatment) เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโลหะอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ซึ่งเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มที่มีสังกะสีและแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลัก อาจมีทองแดงเป็นส่วนผสมด้วย โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงสูง ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัสดุโครงสร้างในอุตสาหกรรมอากาศยาน เนื่องจากมีความแข็งแรงที่สูงและมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับเหล็ก [1]

ในการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่วนใหญ่เป็นการหล่อโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous casting, Conventional DC casting) ซึ่งชิ้นงานที่ได้เป็นลักษณะของแท่งโลหะ (Ingot) หรือแผ่นโลหะ (Slab) ซึ่งในการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่องนี้ ทำให้เกิดปัญหาด้านการแตกร้าวภายในชิ้นงานหล่อเนื่องมาจากการมีปริมาณของธาตุผสมที่มากทำให้เกิดการแยกตัวในระดับจุลภาค (Microsegregation) ภายในชิ้นงานหล่อขึ้น [2] โดยในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะอุณหภูมิภายในชิ้นงานที่ตำแหน่งผิวของชิ้นงานและตำแหน่งตรงกลางชิ้นงานเกิดความแตกต่างกันมาก จึงทำให้เกิดความเค้นสูงภายในชิ้นงานเกิดขึ้น แต่ในปัจจุบันได้มีพัฒนาและปรับปรุงวิธีการหล่อเพื่อลดปัญหาด้านการแตกร้าวภายในชิ้นงาน โดยการนำแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้กับการหล่อ เพื่อเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นเพื่อกวนน้ำโลหะระหว่างกระบวนการหล่อ ส่งผลให้

ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงานลดลง สามารถลดปัญหาเรื่องการแยกตัวระดับจุลภาคลงได้ และยังทำให้ขนาดเกรนภายในโครงสร้างมีความละเอียดขึ้นและมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้งานโลหะผสมอะลูมิเนียมมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมให้ดียิ่งขึ้นด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค, ชนิดของเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น รวมถึงปริมาณของเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC) ตัวอย่างของผลของการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีจากงานวิจัยในอดีตที่มีต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX เช่น การลดอัตราส่วนของปริมาณสังกะสีต่อแมกนีเซียมส่งผลทำให้เกิด Stress – corrosion cracking ในโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ลดลง [1] การลดปริมาณของแมกนีเซียมส่งผลให้ค่าความยืด (Elongation) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้มีค่าสูงขึ้นและค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield strength) สูงขึ้น เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วจะเห็นการศึกษาโครงสร้างของจุลภาค, ชนิดและปริมาณของเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมี มีความสำคัญมากต่อการทำนายสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลง เพื่อประโยชน์ในอนาคตในการควบคุมโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX เพื่อสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานตามสมบัติที่ต้องการต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพื้นฐานทางโลหะวิทยาของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ที่หล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC)
2. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสังกะสี, แมกนีเซียม และทองแดง ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและเฟสต่าง ๆ ของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ที่เกิดขึ้นของชิ้นงานภายหลังกระบวนการหล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC)

3. เพื่อศึกษาและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและเฟสต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization)

4. เพื่อศึกษาและตรวจสอบลำดับของการเกิดเฟสต่าง ๆ ในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC)

5. เพื่อเข้าใจกระบวนการออกแบบโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ในเชิงของการควบคุมโครงสร้างจุลภาค เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไป

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu)

2. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Field (LFEC)

3. ศึกษาและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) โดยศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) เพื่อศึกษาลักษณะและวัดขนาดของเกรนภายในโครงสร้าง และศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและหาปริมาณของโครงสร้างยูเทคติก

4. ศึกษาและตรวจสอบเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อตรวจสอบหาชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน รวมถึงการตรวจสอบชนิดและตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน รวมทั้งวัดปริมาณของธาตุต่าง ๆ ในบริเวณที่สนใจด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดวิเคราะห์แนวการสะท้อนและเลี้ยวเบนของรังสีอิเล็กตรอน (Electron Probe Microscope Analysis, EPMA)

5. ศึกษาช่วงอุณหภูมิของการเกิดเฟสและตรวจสอบลำดับการเกิดเฟสของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ในช่วงการแข็งตัวของน้ำโลหะ และเปรียบเทียบผลการคำนวณเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม Thermo-Calc

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจพื้นฐานทางโลหะวิทยาของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Field (LFEC)

2. สามารถทำนายและควบคุมโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ได้

3. เข้าใจถึงผลของปริมาณของสังกะสี, ทองแดง และแมกนีเซียม ที่มีผลต่อเฟสที่เกิดขึ้น รวมถึงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) ที่เปลี่ยนแปลงไป

4. เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของลักษณะของเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของโลหะอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu)

5. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC) ได้

## บทที่ 2

### การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) จึงทำให้อะลูมิเนียมมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมทางด้านคมนาคมและขนส่ง ซึ่งโลหะอะลูมิเนียมมีความทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันทำให้เกิดฟิล์มบาง ๆ เกิดขึ้น แต่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความแข็งแรงต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยการเติมโลหะผสม โดยอะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับโลหะอื่น ๆ ได้ง่ายมีความสามารถในการไหลตัวอยู่ในเกณฑ์สูง นอกจากนี้สมบัติการยึดตัวได้ง่ายของอะลูมิเนียมจึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยการรีดเป็นแผ่นหรืออัดขึ้นรูปได้สะดวก ทำให้การใช้งานมีขอบเขตกว้างขวางมากจึงมีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรม และโลหะอะลูมิเนียมเป็นโลหะไม่มีพิษ ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ นอกจากนี้อะลูมิเนียมมีสมบัติในด้านการนำไฟฟ้าได้ดีจึงสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า [3]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะอะลูมิเนียม [3]

ระบบผลึก	FCC	( $a = b = c = 4.04 \text{ \AA}$ )
น้ำหนักอะตอม	26.97	g/mol
อุณหภูมิหลอมเหลว	658	$^{\circ}\text{C}$
ความร้อนจำเพาะ (0-100 $^{\circ}\text{C}$ )	0.2259	Cal/g $^{\circ}\text{C}$
สภาพตัวนำความร้อน (20 $^{\circ}\text{C}$ )	0.52	Cal.cm/cm $^2$ . $^{\circ}\text{C}$ .sec
ความหนาแน่น (20 $^{\circ}\text{C}$ )	2.70	g/cm $^3$
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	93	Cal/g
อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว	6.6 %	
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20 $^{\circ}\text{C}$ )	$23.8 \times 10^{-6}$	/ $^{\circ}\text{C}$
ความต้านทานจำเพาะ (20 $^{\circ}\text{C}$ )	2.699	microhm.cm

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียม [3]

ความแข็งแรง (Tensile Strength)	8 – 10	kg/mm <sup>2</sup>
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)	3	kg/mm <sup>2</sup>
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	7800	kg/mm <sup>2</sup>
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40 – 45	%
ความแข็ง (Hardness)	16 – 20	HB

### 2.1.2 ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียม

โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถแบ่งตามกระบวนการเริ่มต้นของการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมมาใช้ประโยชน์ ออกเป็น 2 ประเภท คือ โลหะผสมสำหรับขึ้นรูปเย็น (Wrought alloys) และโลหะผสมสำหรับหล่อหลอม (casting alloys)

#### โลหะผสมสำหรับขึ้นรูปเย็น

เป็นโลหะผสมที่จะผ่านการขึ้นรูปเย็นให้มีรูปร่างเป็นแผ่น แท่ง หรือลวด โลหะผสมอะลูมิเนียมผสมแบบนี้มีทั้งแบบสามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ และไม่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการรมวิธีขึ้นรูปเย็น (Cold working) ส่วนใหญ่จะมีทองแดง, ซิลิคอน และแมกนีเซียมเป็นธาตุผสม

การแบ่งประเภทของกลุ่มโลหะผสมสำหรับขึ้นรูปเย็น จะใช้ระบบตัวเลข 4 ตัว ตัวเลขหลักที่หนึ่งแสดงถึงกลุ่มโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุผสมเฉพาะ ตัวเลขหลักที่สองแสดงถึงการปรับปรุงในโลหะผสมเดิมหรือปริมาณจำกัดของสิ่งเจือปน และตัวเลขสองตัวหลังบอกถึงความบริสุทธิ์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม [4]

ตารางที่ 2.3 แสดงรหัสของกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็น [5]

1xxx	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (pure Al)
2xxx	อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al – Cu)
3xxx	อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (Al – Mn)
4xxx	อะลูมิเนียมผสมซิลิคอน (Al – Si)
5xxx	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Al – Mg)

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) แสดงรหัสของกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็น [5]

6xxx	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Al – Mg – Si)
7xxx	อะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Al – Zn)
8xxx	อะลูมิเนียมผสมธาตุอื่น ๆ
9xxx	ยังไม่มีการใช้รหัสกลุ่มนี้

#### โลหะผสมสำหรับหล่อ

เป็นโลหะที่มีสมบัติพิเศษมีความสามารถในการไหลตัวที่ดี ช่วยให้การหล่อเป็นรูปพรรณกระทำได้ง่าย ส่วนใหญ่ของโลหะผสมประเภทนี้สามารถใช้กรรมวิธีอบชุบด้วยความร้อนได้ ธาตุผสมที่สำคัญได้แก่ ซิลิกอน ซึ่งซิลิกอนเป็นธาตุผสมที่สำคัญที่สุดสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทหล่อหลอม เพราะซิลิกอนจะทำให้การไหลตัวของโลหะหลอมเหลวไหลดีขึ้น และความสามารถในการบ่อนเข้าไปในแม่พิมพ์ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม โดยปกติจะผสมซิลิกอนมีอยู่ประมาณ 5 -12% ส่วนแมกนีเซียมมักจะถูกเติมลงไปประมาณ 0.3-1.0% เพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการชุบแข็งแบบตกตะกอน นอกจากนี้ยังมีการเติมธาตุผสมอื่น ๆ เช่น ทองแดง, สังกะสี, ดีบุก, ไทเทเนียม และโครเมียม

ส่วนการแบ่งประเภทของกลุ่มโลหะผสมสำหรับหล่อ จะใช้ระบบตัวเลข 4 ตัว เหมือนกับโลหะผสมสำหรับขึ้นรูปเย็น

ตารางที่ 2.4 แสดงรหัสของกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อหลอม [5]

1xx.x	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (pure Al)
2xx.x	อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al – Cu)
3xx.x	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (Al – Si, Al – Si - (Mg, Cu))
4xx.x	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (binary Al – Si)
5xx.x	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Al – Mg)
6xx.x	ยังไม่มีการใช้รหัสกลุ่มนี้
7xx.x	อะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Al – Zn)
8xx.x	อะลูมิเนียมผสมดีบุก
9xx.x	อะลูมิเนียมผสมธาตุอื่น ๆ

ตัวอย่างผลของธาตุผสมต่อสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียมผสม [5] เช่น

ทองแดง (Cu) เป็นธาตุที่นิยมผสมในปริมาณ 4 – 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมีผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งในสภาพหล่อและสภาพการผ่านกระบวนการทางความร้อน แต่ทองแดงจะลดการต้านทานการกัดกร่อน ลดความต้านทานต่อการเกิด hot tear และลดสมบัติด้านการหล่อหลอม

แมกนีเซียม (Mg) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง อีกทั้งยังช่วยให้มีความสามารถในการทำกระบวนการทางความร้อน

ซิลิกอน (Si) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อ เพิ่มความสามารถในการไหลตัว เพิ่มความต้านทานของการเกิด hot tear และเพิ่มเปอร์เซ็นต์ การแข็งตัวในบริเวณยูเทคติก

สังกะสี (Zn) ไม่มีสมบัติอย่างเด่นชัดในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล แต่ช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการทางความร้อนต่างๆ

ดีบุก (Sn) เพิ่มความแข็งแรงจากกระบวนการ Precipitation hardening และเพิ่มความสามารถในการกลึงไส เป็นต้น

เหล็ก (Fe) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเกิด hot tear และลดการเหนียวติดกับแบบหล่อในงาน Die Casting แต่การเพิ่มของธาตุเหล็กทำให้ความเหนียวลดลง

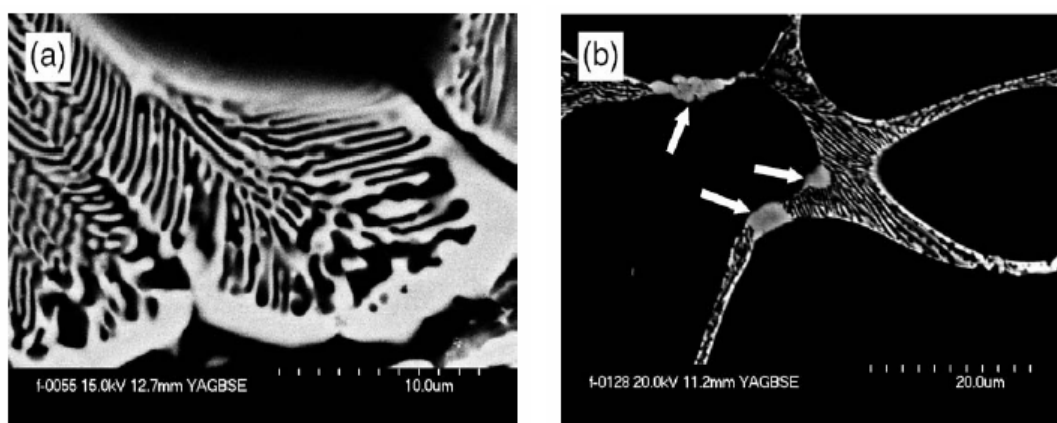
แมงกานีส (Mn) โดยปกติแมงกานีสจัดเป็นธาตุมลทินในงานหล่อ แต่ในงานขึ้นรูปเย็นแมงกานีสมีความสำคัญมาก ในเรื่อง Work Hardening

### 2.1.3 โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX [1, 6]

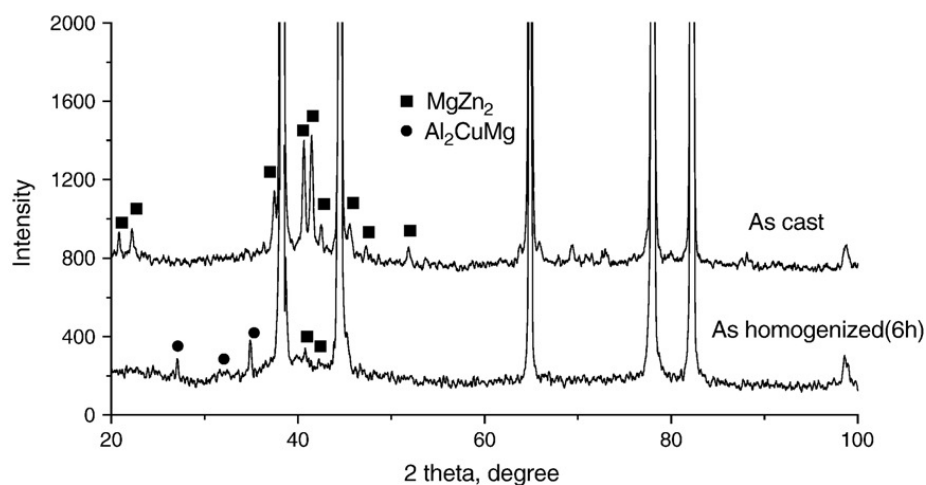
โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงมาก เนื่องจากการเติมธาตุผสมหลายชนิด โดยการเติมสังกะสี, แมกนีเซียม เป็นธาตุผสมหลัก อาจมีการเติมทองแดงลงไปปริมาณเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ รวมถึงการเติมโครเมียม, แมงกานีส และเซอร์โคเนียม ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อควบคุมโครงสร้างของเกรนระหว่างการขึ้นรูป รวมถึงกระบวนการปรับปรุงทางความร้อน (Heat treatment) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโลหะให้สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งาน โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX มีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทำให้มีความ



สนใจต่อการใช้งานด้านวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างซึ่งอาศัยความแข็งแรงสูง และน้ำหนักเบา เช่น อุตสาหกรรมด้านอวกาศ ส่วนประกอบของเครื่องบินรบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้มีปัญหาการเกิด stress-corrosion cracking ซึ่งการเติมทองแดงในปริมาณเล็กน้อยสามารถแก้ปัญหาด้าน stress-corrosion cracking แต่การเพิ่มปริมาณของทองแดงทำให้เกิดปัญหาด้านการเชื่อม โดยอาจเกิดรอยแตกแบบ hot-cracking ระหว่างการแข็งตัวของรอยเชื่อม การลดอัตราส่วนของสังกะสีต่อแมกนีเซียมจะสามารถลดปัญหานี้ได้เช่นกัน [1] หรือการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งรูปแบบของการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อนขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วย

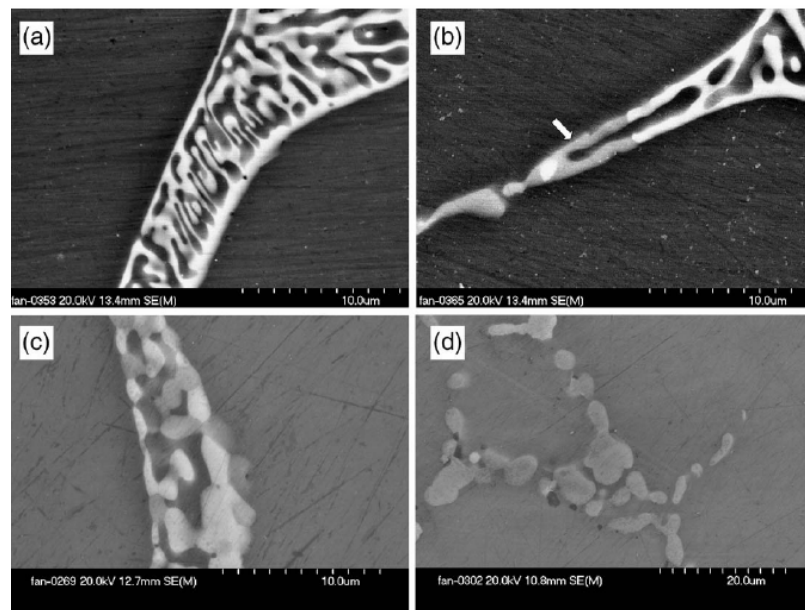


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-Zn-Mg-Cu  
(a) โครงสร้างยูเทคติก (b) ลักษณะของเฟสเหล็ก (Fe-bearing phase) [6]



ภาพที่ 2.2 X-ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.31Zn-2.33Mg-1.7Cu ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (ระยะเวลา 6 ชั่วโมง) [6]

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) [6] พบว่าเฟสที่มีเหล็กหรือทองแดงปริมาณมากเป็นส่วนประกอบที่ตกผลึกภายในโครงสร้าง จะส่งผลทำให้ความแกร่งและความต้านการล้าของชิ้นงานลดลง เพราะเฟสดังกล่าวส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าวในระดับจุลภาคภายในชิ้นงาน ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้มีเฟสหลายชนิดเกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิประมาณ 460 °C ระหว่างขั้นตอนการแข็งตัวของน้ำโลหะ เช่น S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ), T (Al-Mg-Zn),  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงาน และวิธีการหล่อโลหะส่งผลถึงปริมาณและชนิดของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่ตกผลึกภายในชิ้นงาน รวมถึงลักษณะโดยรวมของโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมด้วย โดยจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากหล่อแบบกึ่งต่อเนื่องของ Al-6.31Zn-2.33Mg-1.7Cu-0.12Zr (0.09Fe, 0.05Si)



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-Zn-Mg-Cu ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C เป็นระยะเวลา (a) 5 นาที, (b) 30 นาที, (c) 6 ชั่วโมง และ (d) 24 ชั่วโมง [6]

โดยจากการศึกษาโครงสร้างยูเทคติกพบว่ามีเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) ซึ่ง Al และ Cu ละลายอยู่ในเฟสดังกล่าวด้วย และยังพบเฟส  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  ในโครงสร้างยูเทคติกด้วยดังภาพที่ 2.1 และเมื่อศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว โดยการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นแสดงใน X-ray Diffraction Pattern ที่เปรียบเทียบการตรวจสอบเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (ระยะเวลา 6 ชั่วโมง) ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า

ชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการอบเนื้อเดียวมีเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) ที่สามารถตรวจพบเจอด้วยเครื่อง XRD ซึ่งชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการหล่อไม่สามารถตรวจพบ แสดงว่าภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวมีการเปลี่ยนแปลงเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) เป็นเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) ซึ่งสอดคล้องกับการการตรวจจสอบโครงสร้างยูเทคติกดังภาพที่ 2.3 แสดงผลระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและชนิดของเฟสด้วยดังภาพที่ 2.3 โดยเฟส  $\text{MgZn}_2$  ที่โครงสร้างยูเทคติกจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  ตามลูกศรดังภาพที่ 2.3

(b)

#### 2.1.4 แผนภูมิสมดุลงที่เกี่ยวข้อง

แผนภูมิสมดุลง (Phase Diagram) มีความสำคัญมากต่อการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม แต่โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการศึกษาในวิจัยนี้มีส่วนผสมหลัก คือ อะลูมิเนียม, สังกะสี, แมกนีเซียม และทองแดง ซึ่งไม่มีแผนภูมิสมดุลงดังกล่าวในการศึกษา จึงมีความจำเป็นที่ศึกษาแผนภูมิสมดุลงสององค์ประกอบ (Binary Phase Diagram) และแผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบ (Ternary Phase Diagram) หลายระบบในการศึกษาและวิเคราะห์

โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการศึกษามีส่วนประกอบทางเคมี คือ 6.4-10.0 wt % Zn, 1.0-3.0 wt % Mg, 1.0-2.5 wt % Cu และรวมถึงปริมาณของ Zr (0.14 wt %), Fe (0.05 wt %) และ Si (0.05 wt %) นอกจากนั้นเป็นปริมาณของอะลูมิเนียม

ในการวิเคราะห์เฟสหลังจากการแข็งตัวจะใช้แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบแบบ Liquidus Projection และแบบ Isothermal Section ที่อุณหภูมิหลังการเกิดปฏิกิริยาภายในระบบ โดยใช้แผนภูมิสมดุลงของระบบ Al-Zn-Mg, Al-Zn-Cu และ Al-Mg-Cu ซึ่งวิเคราะห์การแข็งตัวของน้ำโลหะด้วยสมการ Scheil's Equation ดังสมการที่ 2.1 เป็นสมการอธิบายปรากฏการณ์ของการแข็งตัวของน้ำโลหะที่ไม่มีการแพร่ของมวลในสถานะของแข็ง [7] ซึ่งใกล้เคียงกับลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะในความเป็นจริง

$$C_L = C_0 (1-f_s)^{k-1} \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

เมื่อ  $C_L$  คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมในเฟสของเหลว

$C_0$  คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมเริ่มต้น

$f_s$  คือ สัดส่วนของเฟสของแข็ง

k คือ Equilibrium Partition Ratio

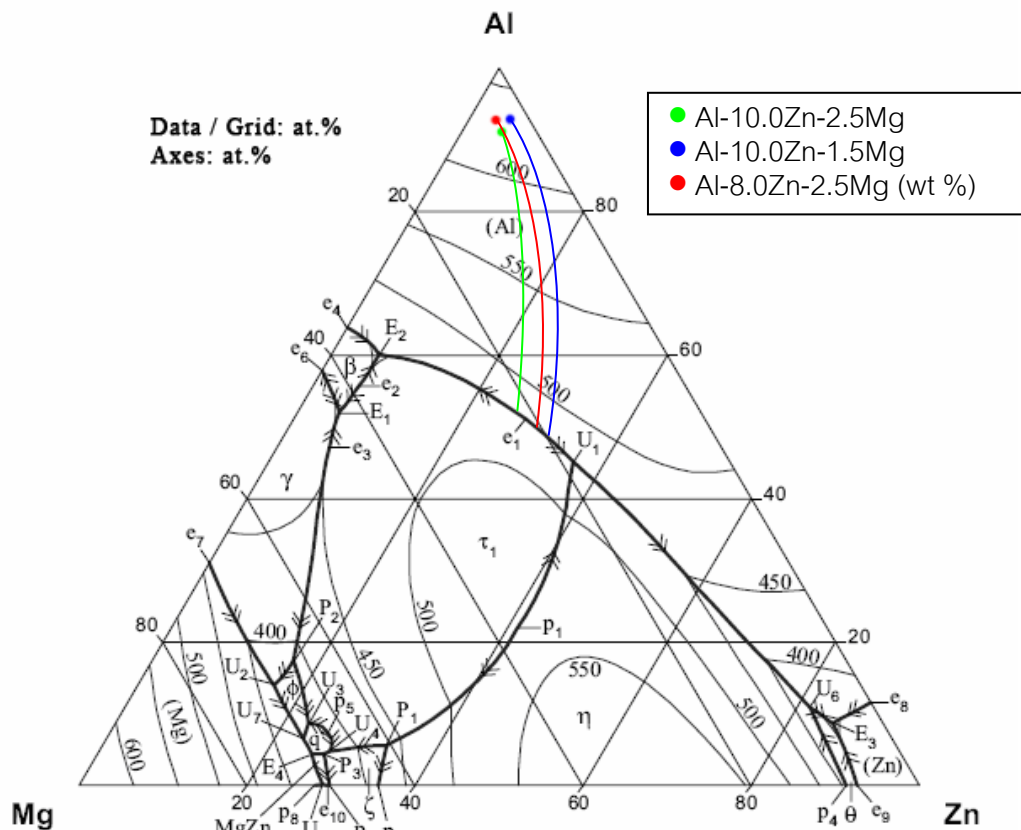
$$\text{โดย } k = C_s^* / C_L^*$$

เมื่อ  $C_s^*$  คือ ความเข้มข้นของเฟสของแข็งที่ Interface ระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว

$C_L^*$  คือ ความเข้มข้นของเฟสของเหลวที่ Interface ระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว

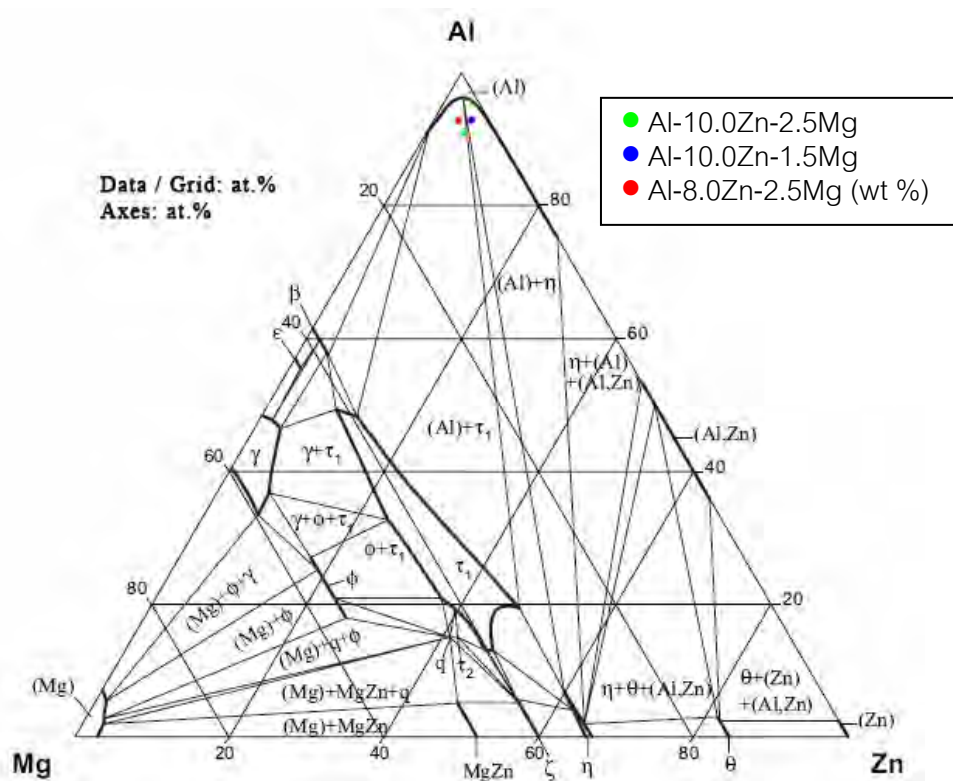
ซึ่งค่า k มีค่าคงที่ในระบบนั้น ๆ สามารถประมาณค่าได้จากแผนภูมิสมดุลสององค์ประกอบของระบบที่ต้องการ

จากสมการ Scheil's Equation จะใช้ในการคำนวณทิศทางของแข็งตัวของน้ำโลหะในแผนภูมิสมดุลเพื่อวิเคราะห์เฟสที่น้ำจะเกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-Zn-Mg-Cu



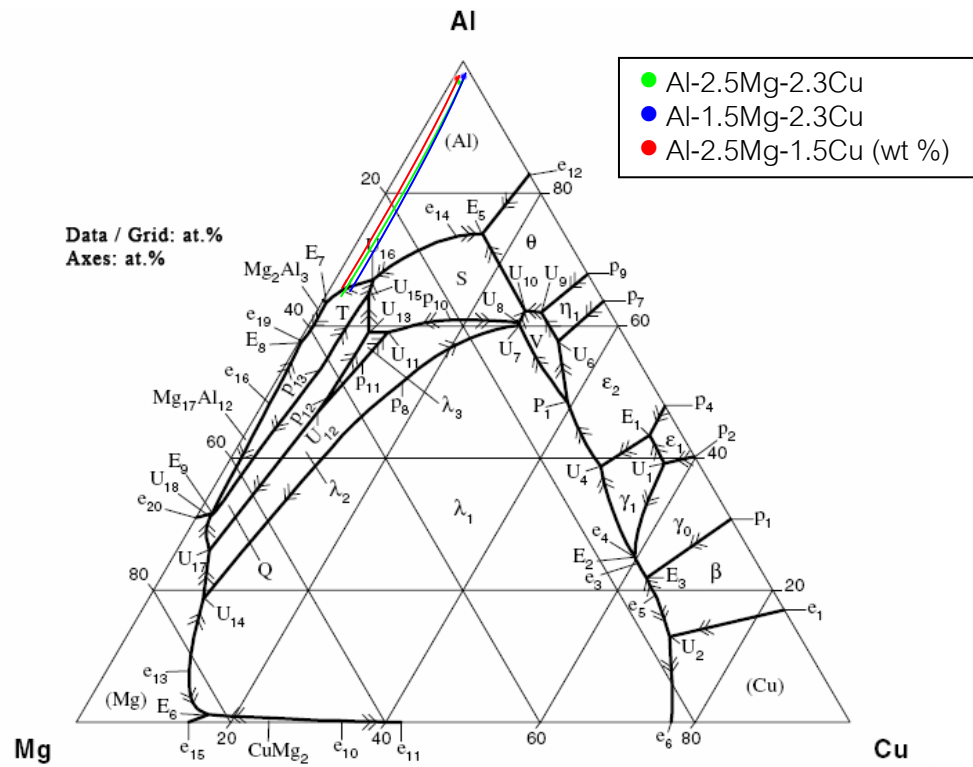
ภาพที่ 2.4 แผนภูมิสมดุลสามองค์ประกอบของ Al-Zn-Mg แบบ Liquidus Projection [8]

จากภาพที่ 2.4 แสดงเส้นทางการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยยกตัวอย่างโลหะผสมอะลูมิเนียม เส้นสีเขียวแสดงเส้นทางการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg (wt %) จุดและเส้นสีแดงแสดงโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-8.0Zn-2.5Mg และจุดและเส้นสีน้ำเงินแสดงโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.5Mg และจากภาพที่ 2.5 แสดงแผนภูมิสมดุลแบบ Isothermal section ที่อุณหภูมิ 335 °C ซึ่งสามารถคาดคะเนเฟสสุดท้ายของโลหะผสมอะลูมิเนียมได้ โดยโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg และ Al-8.0Zn-2.5Mg เริ่มจากการเกิดเฟส  $\alpha$  (Al) แล้วเกิด Binary eutectic reaction เกิดเป็น  $\alpha$  (Al) และ  $\tau_1$  ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) แต่โลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10Zn-1.5Mg จะมีจะเกิด Ternary peritectic ( $U_1; L + \tau_1 = \alpha$  (Al) +  $MgZn_2$ ) ทำให้สุดท้ายเกิดเฟส  $\alpha$  (Al) และ  $MgZn_2$

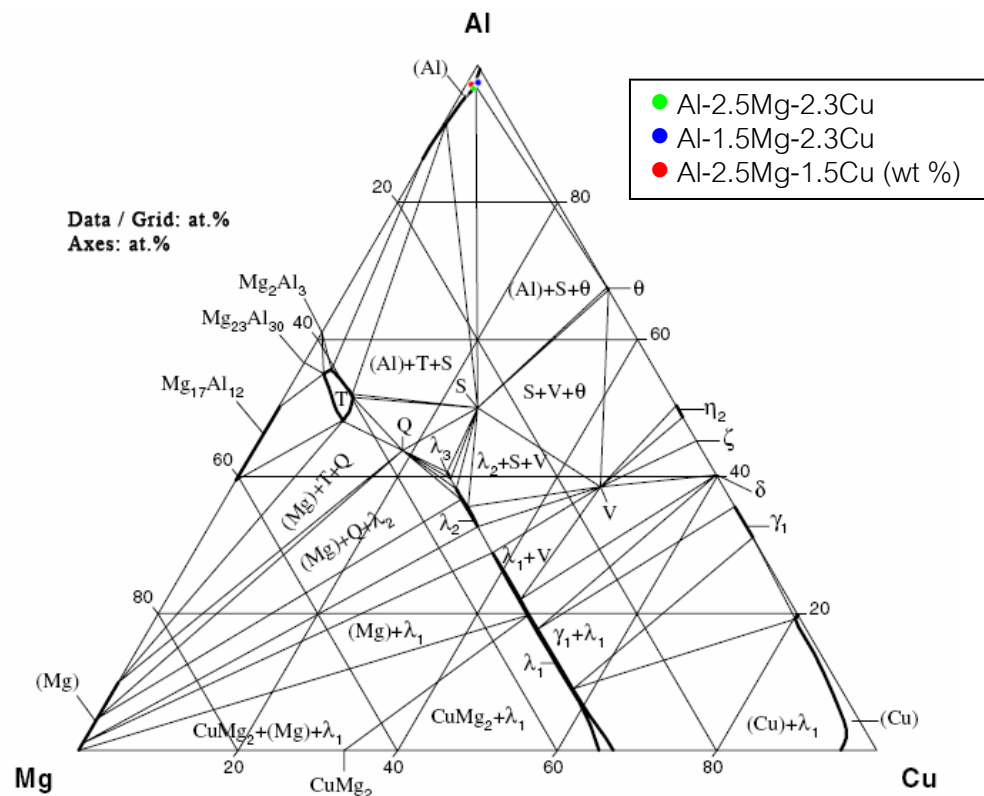


ภาพที่ 2.5 แผนภูมิสมดุลสามองค์ประกอบของ Al-Zn-Mg แบบ Isothermal Section ที่อุณหภูมิ 335 °C [8]

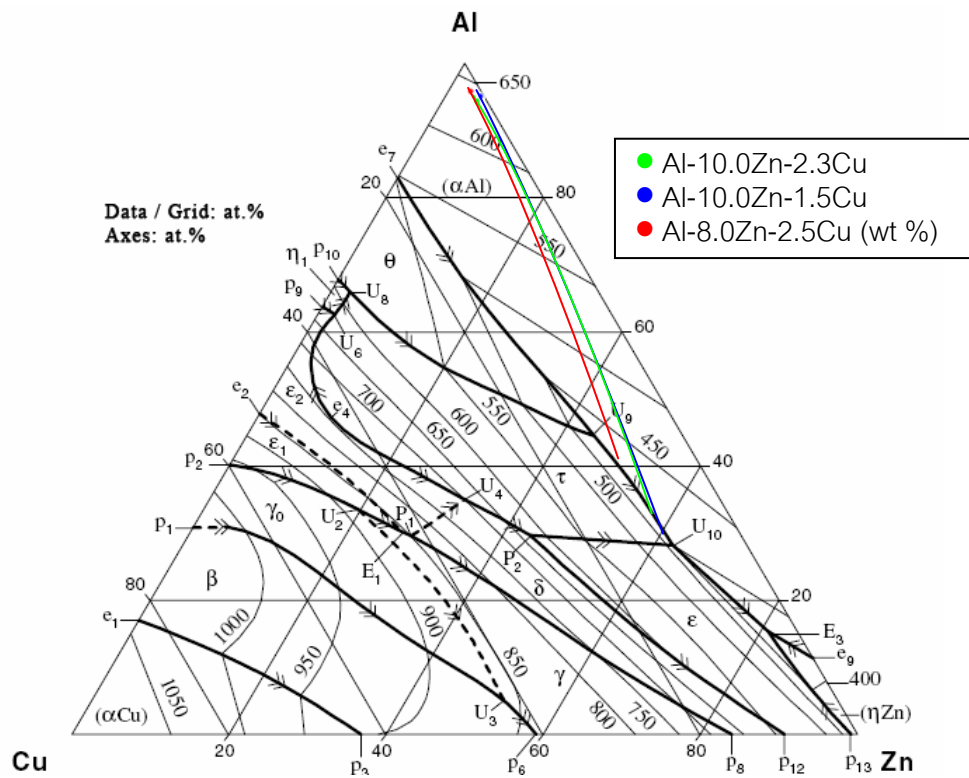
เมื่อพิจารณาแผนภูมิสมดุลสามองค์ประกอบ Al-Mg-Cu ทั้งแบบ Liquidus projection และ Isothermal section ที่อุณหภูมิ 400 °C ดังภาพที่ 2.6 และ 2.7 ซึ่งแสดงตัวอย่างการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-2.5Mg-2.3Cu, Al-1.5Mg-2.3Cu และ Al-2.5Mg-1.5Cu โดยหลังจากอุณหภูมิ 400 °C เป็นอุณหภูมิหลังจากการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในระบบของโลหะผสม Al-Mg-Cu โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งสามตัวอย่างจะเป็น Al อย่างเดียว



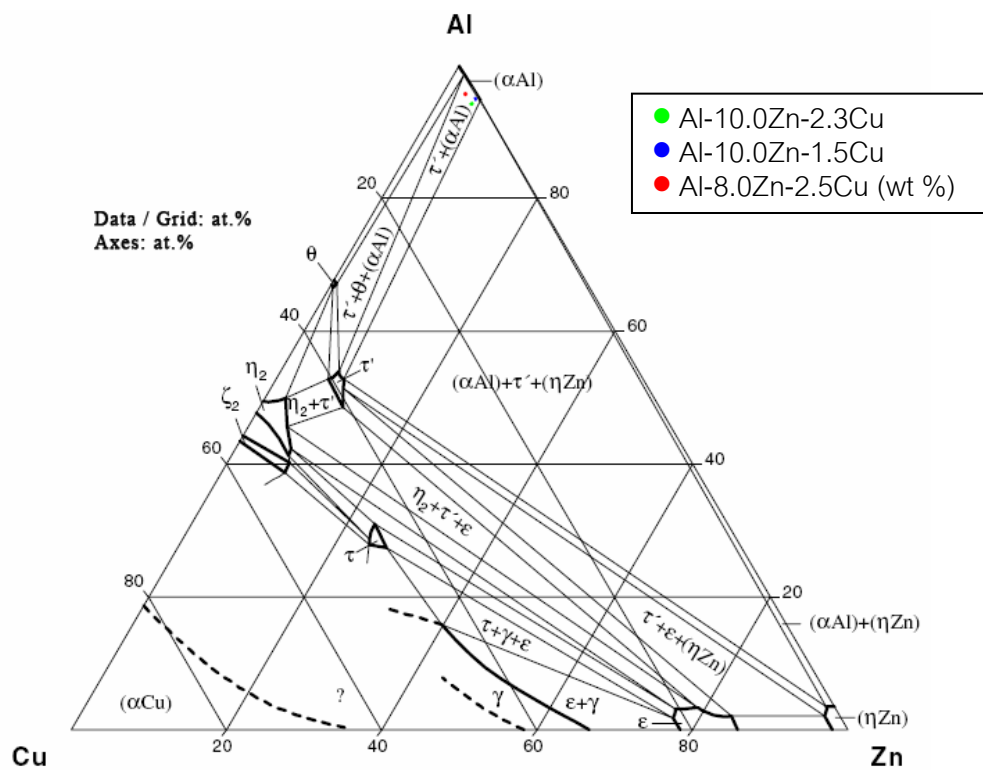
ภาพที่ 2.6 แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Mg-Cu แบบ Liquidus Projection [8]



ภาพที่ 2.7 แผนภูมิสมดุลงสามองค์ประกอบของ Al-Mg-Cu แบบ Isothermal Section ที่อุณหภูมิ 400 °C [8]



ภาพที่ 2.8 แผนภูมิสมมูลสามองค์ประกอบของ Al-Cu-Zn แบบ Liquidus Projection [8]



ภาพที่ 2.9 แผนภูมิสมมูลสามองค์ประกอบของ Al-Cu-Zn แบบ Isothermal Section  
ที่อุณหภูมิ 200 °C [8]

และสุดท้ายพิจารณาแผนภูมิสมมูลสามองค์ประกอบ Al-Cu-Zn ทั้งแบบ Liquidus projection และ Isothermal section ที่อุณหภูมิ 200 °C ดังภาพที่ 2.8 และ 2.9 ซึ่งแสดงตัวอย่างการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.3Cu, Al-10.0Zn-1.5Cu และ Al-8.0Zn-2.5Cu โดยหลังจากอุณหภูมิ 200 °C เป็นอุณหภูมิหลังจากการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในระบบของโลหะผสม Al-Cu-Zn ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งสามตัวอย่างมีลำดับการเกิดเฟสคล้ายกัน และเฟสในการแข็งตัวประกอบด้วยเฟส  $\alpha$  (Al) และ  $\tau'$  ( $\text{Cu}_3\text{Zn}$ )

จากการพิจารณาแผนภูมิสามองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการศึกษาในวิจัยนี้พบว่าเฟสที่เกี่ยวข้องหลังการแข็งตัวภายในโครงสร้างได้แก่  $\alpha$  (Al),  $\text{MgZn}_2$ ,  $\tau_1$  ( $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$ ) และ  $\tau'$  ( $\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) อย่างที่กล่าวมาแล้วว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสี่องค์ประกอบหลัก (Al-Zn-Mg-Cu) ซึ่งไม่มีแผนภูมิสมมูลในการศึกษา ดังนั้นจึงอาศัยแผนภูมิสามองค์ประกอบในการช่วยวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง

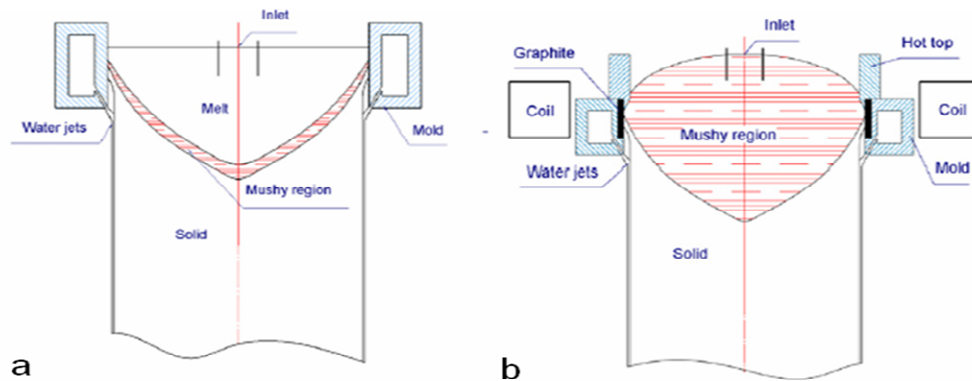
## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX มีความแข็งแรงสูงมากเป็นพิเศษ เพราะมีการเติมธาตุผสมหลายชนิดและมีปริมาณมากดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ชิ้นงานที่เกิดจากการหล่อแบบ Direct chill (DC casting) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ถูกคิดค้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 โดยเป็นการเทน้ำโลหะหลอมเหลวสู่แบบหล่อ และมีน้ำหล่อเย็นด้านข้างของแท่งโลหะในระหว่างการแข็งตัวดังภาพที่ 2.3 ซึ่งการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ด้วยเทคนิคแบบ DC นี้จะส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเกิดรอยร้าวได้ง่าย เนื่องจากการมีธาตุผสมปริมาณมากทำให้เกิดสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกตกผลึกจำนวนมาก จึงเกิดการแตกร้าวตามขอบเกรน นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุกรมของบริเวณการหล่อด้วยเทคนิคแบบ DC มีผลต่อการแตกหักภายในของชิ้นงาน เพราะความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณใจกลางชิ้นงานและบริเวณขอบของชิ้นงานมีความแตกต่างกันมาก ทำให้เกิด Thermal stress เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ซึ่งส่งผลถึงความแข็งแรงและความแกร่งต่ำลง [2] ด้วยเหตุนี้จึงมีการปรับปรุงด้านเทคนิคการหล่อ ซึ่งเทคนิคการหล่อแบบ Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC) เป็นการใช้นามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้กับการหล่อโลหะ โดยการนำขดลวดเหนี่ยวนำติดตั้งด้านข้างของแบบหล่อเพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นเพื่อถ่วงน้ำหนักโลหะหลอมเหลวดังภาพที่ 2.3

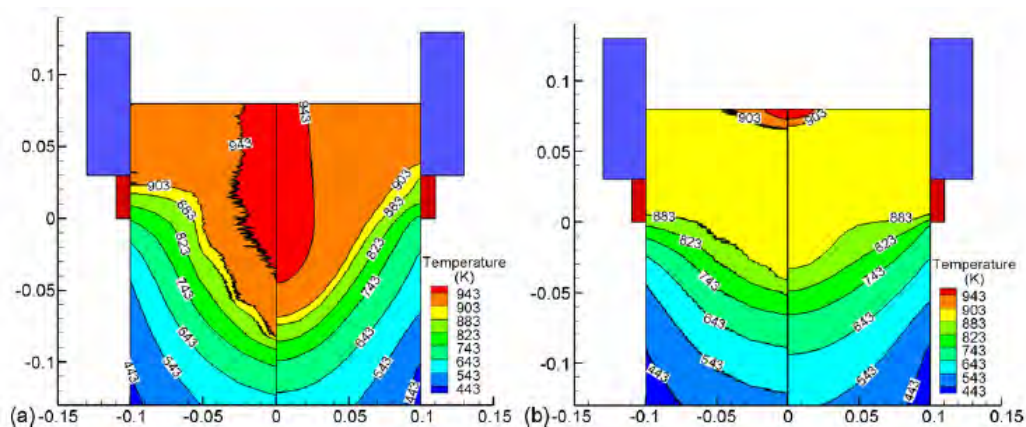
ในปี ค.ศ. 2006 Haitao Zhang และคณะ [8] ได้ศึกษาแบบจำลองการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ภายใต้อินพุตแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ โดยแบบจำลองการหล่อโลหะ



ด้วยเทคนิค LFEC แสดงดังภาพที่ 2.10 โดยบริเวณที่โลหะหลอมเหลวนั้นจะมีสถานะแบบกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว (Mushy zone) ซึ่งแตกต่างกันกับการหล่อด้วยเทคนิค DC โดยบริเวณโลหะหลอมเหลวจะมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งทำให้บริเวณดังกล่าวมีคุณสมบัติของชิ้นงานภายหลังการหล่อแตกต่างกันมากกว่าชิ้นงานที่หล่อด้วยเทคนิค LFEC ดังภาพที่ 2.11 ด้วยสาเหตุนี้ทำให้ลดปัญหาการแตกร้าวภายในชิ้นงานเนื่องจากความเค้นภายในชิ้นงานลดลงที่มีสาเหตุมาจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิภายในชิ้นงาน



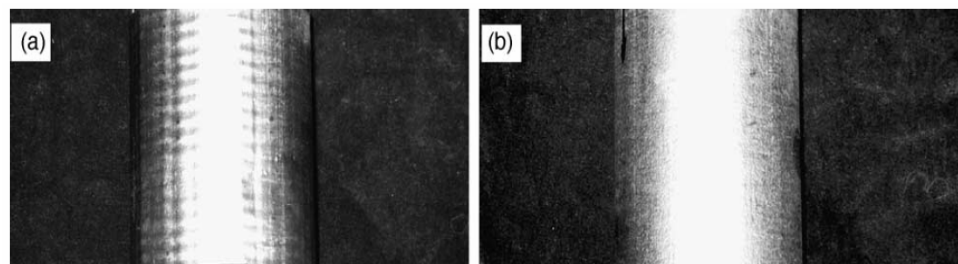
ภาพที่ 2.10 แบบจำลองการหล่อแบบกึ่งต่อเนื่องเทคนิค (a) DC (b) LFEC



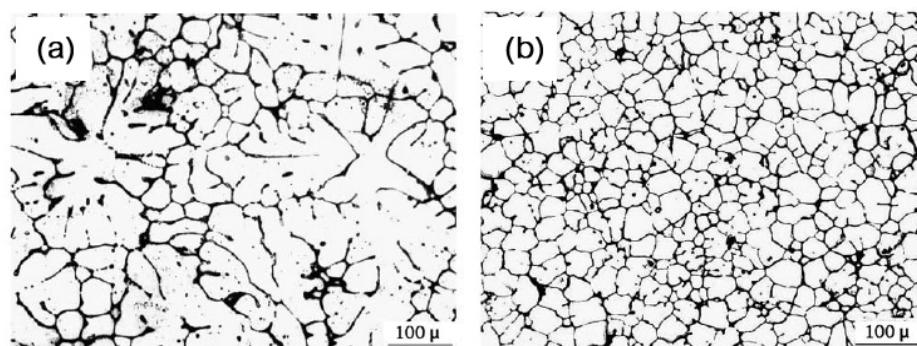
ภาพที่ 2.11 แบบจำลองแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของชิ้นงานหลังการหล่อด้วยเทคนิค (a) DC (b) LFEC

ในปี ค.ศ. 2005 J. Dong และคณะ [9] ได้ศึกษาการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-Zn-Mg-Cu-Zr ด้วยเทคนิค LFEC พบว่าพื้นผิวที่ได้จากการหล่อด้วยเทคนิค LFEC มีพื้นผิวที่คุณภาพดีกว่าการหล่อด้วยเทคนิค DC ดังภาพที่ 2.12 นอกจากนี้พบว่าการกระจายตัวของเฟสต่าง ๆ ที่เกิดระหว่างการแข็งตัวสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน ทำให้ขนาดเกรนที่เกิดขึ้นมีความละเอียดและมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งขนาดเฉลี่ยของขนาดเกรนเท่ากับ 20-30 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเกรนเล็กกว่า

เกรนของชิ้นงานที่หล่อด้วยเทคนิค DC โดยมีขนาดใหญ่กว่า 120 ไมครอนดังภาพที่ 2.13 ขนาดเกรนที่เล็กและใกล้เคียงกันของชิ้นงานที่หล่อด้วยเทคนิค LFEC จะส่งผลให้ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงและความแกร่งเพิ่มสูงขึ้นด้วย



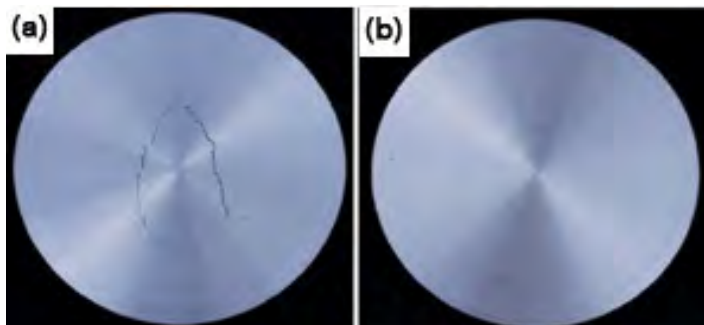
ภาพที่ 2.12 พื้นผิวของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค (a) DC และ (b) LFEC



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค (a) DC และ (b) LFEC

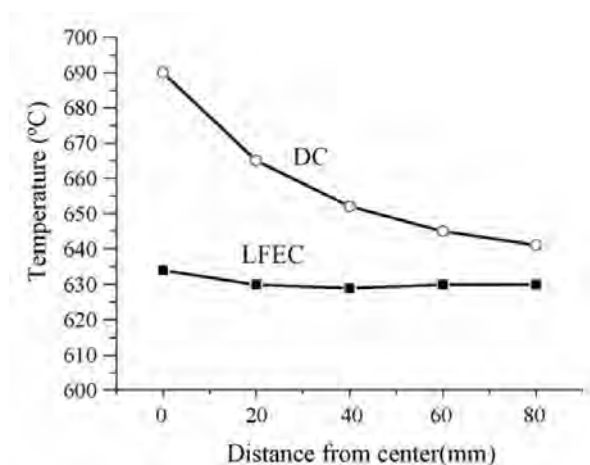
ในปี ค.ศ. 2005 Zuo Yubo และคณะ [10] ได้ศึกษาการปรับปรุงการเกิดรอยร้าวที่เกิดจากการหล่อด้วยเทคนิค DC ด้วยการหล่อแบบเทคนิค LFEC ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่หล่อด้วยเทคนิค LFEC ไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในชิ้นงานดังภาพที่ 2.14 ส่วนชิ้นงานที่หล่อด้วยเทคนิค DC ได้พบรอยร้าวในชิ้นงาน เมื่อนำพื้นผิวของรอยแตกร้าวนั้นไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าเป็นรอยแตกแบบเปราะที่เกิดขึ้นตามขอบเกรน โดยเกิดการแยกตัวตามโครงสร้างยูเทคติกที่ขอบเกรน เนื่องจากบริเวณขอบเกรนมีสารประกอบตกผลึกในปริมาณมากจึงส่งผลให้เกิดการแยกตัวตามขอบเกรนขึ้น แต่ชิ้นงานที่หล่อด้วยด้วยเทคนิค LFEC ไม่พบการแยกตัวตามขอบเกรน ซึ่งเป็นผลมาจากมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำส่งผลให้เกิดการแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากวนน้ำโลหะในระหว่างการหลอมน้ำโลหะในระหว่างขั้นตอนการหล่อ และนอกจากนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงานระหว่างการหล่อด้วยเทคนิค LFEC มีความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงานลดลงกว่า

ชิ้นงานที่หล่อด้วยเทคนิค DC ดังภาพที่ 2.15 ด้วยเหตุนี้ทำให้ความเค้นภายในชิ้นงานลดลง และไม่มีการแตกร้าวระดับจุลภาคภายในชิ้นงานด้วย



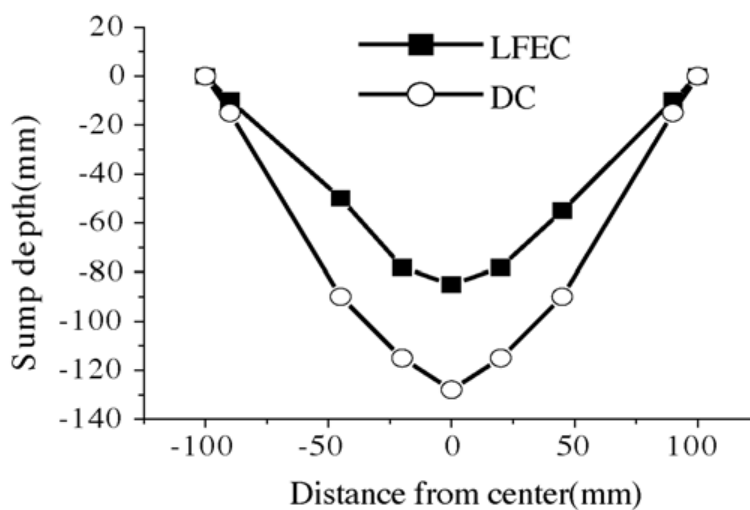
ภาพที่ 2.14 แสดงความแตกต่างของการเกิดรอยร้าวในชิ้นงานของการหล่อด้วยเทคนิค

(a) DC และ (b) LFEC

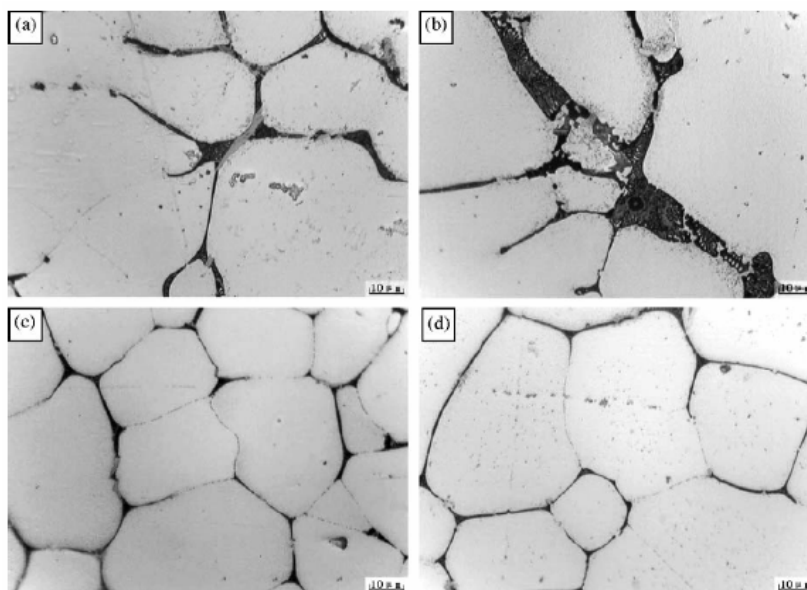


ภาพที่ 2.15 อุณหภูมิภายในชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค DC และ LFEC

รวมถึงการศึกษา Sump depth (ตำแหน่งแข็งตัวสุดท้ายที่ตรงกลางชิ้นงาน) ค่า Sump depth ส่งผลถึงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงาน โดยค่า sump depth ที่สูงนี้จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงานสูงขึ้น และทำให้ความเค้นภายในเพิ่มขึ้นด้วยการหล่อชิ้นงานด้วยเทคนิค LFEC ช่วยลดค่า Sump depth ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.16 เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณขอบเกรนของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค DC และ LFEC พบว่าบริเวณขอบเกรนของชิ้นงานเกิดโครงสร้างยูเทคติกที่เป็นสาเหตุของรอยแตกร้าว โดยขึ้นอยู่กับปริมาณและความหนาแน่นของโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งปริมาณและความหนาแน่นของโครงสร้างยูเทคติกของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค LFEC มีปริมาณและความหนาแน่นน้อยกว่าชิ้นงานที่หล่อด้วยเทคนิค DC ดังภาพที่ 2.17



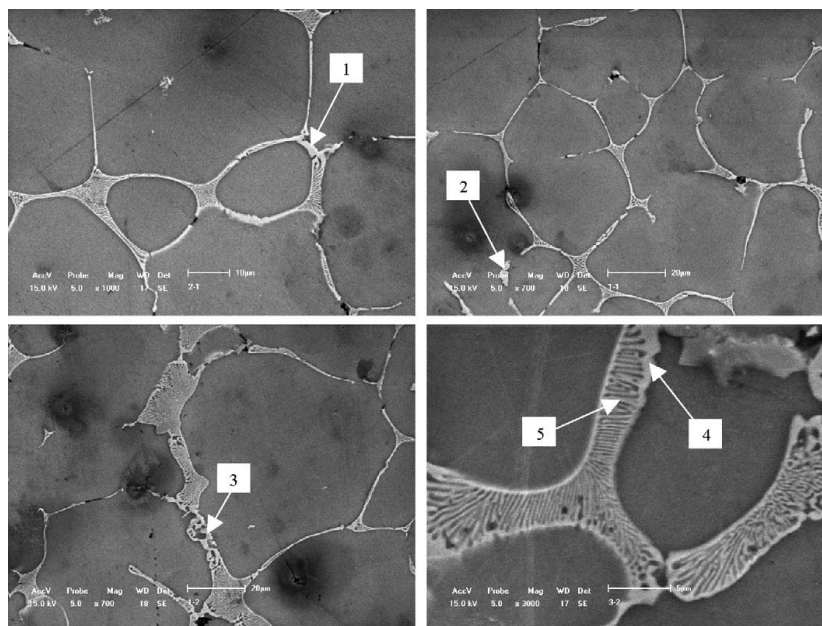
ภาพที่ 2.16 แสดง Sump depth ของเทคนิคการหล่อ DC และ LFEC



ภาพที่ 2.17 โครงสร้างยูเทคติกบริเวณขอบเกรนของชิ้นงานหล่อด้วยเทคนิค

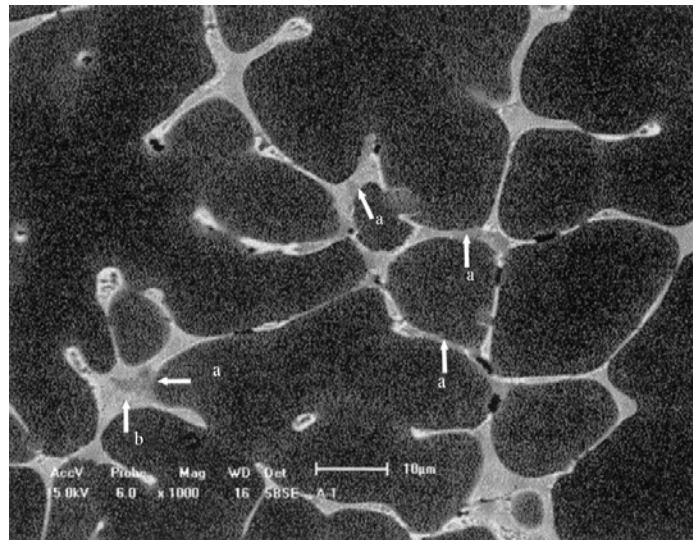
(a,b) DC และ (c,d) LFEC

นอกจากนี้ Zuo Yubo และคณะ [10] ได้ศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-Zn-Mg-Cu-Zr) ที่หล่อด้วยเทคนิค LFEC จากการศึกษพบว่าเฟส T (Al-Zn-Mg-Zn) เป็นจำนวนมากภายในโครงสร้างในบริเวณขอบเกรนดังภาพที่ 2.18 จุดที่ 1 และ 2 และพบว่าเฟส  $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu) ในบริเวณดังกล่าวด้วยดังภาพที่ 2.18 จุดที่ 3 นอกจากนี้พบว่าโครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วย Al และ T (Al-Zn-Mg-Zn) ดังภาพที่ 2.18 จุดที่ 4 และ 5

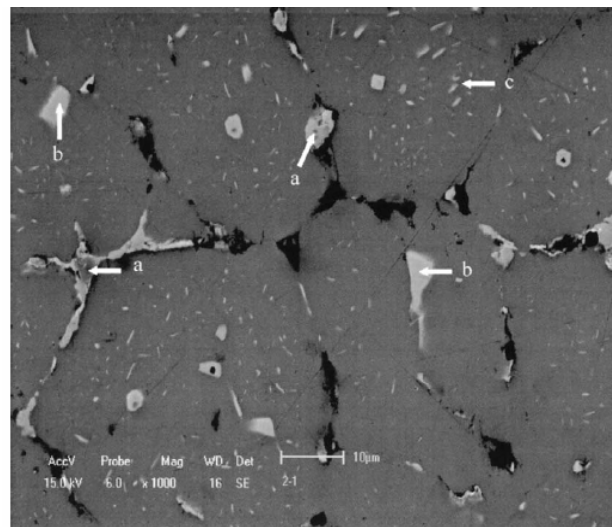


ภาพที่ 2.18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Al-Zn-Mg-Cu-Zr  
จุดที่ 1 และ 2 คือ เฟส T (Al-Zn-Mg-Zn), จุดที่ 3 คือ เฟส  $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu)  
และจุดที่ 4 และ 5 คือ โครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วย Al และ T (Al-Zn-Mg-Zn)

ในปี ค.ศ. 2004 Yanxia li และคณะ [11] ได้ศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างโลหะผสมอะลูมิเนียม (Al-10Zn-2.5Mg-2.5Cu) โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมนี้ผลิตจากการหล่อด้วยเทคนิค LFEC จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังภาพที่ 2.19 พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อก็มีโครงสร้างเดนไดรต์ปริมาณมาก และจากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Energy spectrum microanalysis (ESM) พบว่ามีกลุ่มของสารประกอบ Al-Cu-Fe และ Al-Mg-Zn-Cu ในโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการหล่อ และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์สารประกอบในโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.20 พบว่าอนุภาคของ  $\eta$  (MgZn<sub>2</sub>) ตกผลึกในเฟสพื้น และมีสารประกอบ Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe และ T (Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub>) ภายในโครงสร้างหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) โดยสารประกอบ Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> พบว่ามี Cu ละลายอยู่ภายในโครงสร้างของ Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> ซึ่งเชื่อว่าจะจะเป็นสารประกอบ Al<sub>14</sub>Mg<sub>33</sub>Zn<sub>37</sub>Cu<sub>13</sub> ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับ Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> โดยหลังจากผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) สารประกอบ Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe ไม่สามารถละลายได้ และกระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งเป็นเฟสที่มีความเสถียร แต่สารประกอบ Al<sub>14</sub>Mg<sub>33</sub>Zn<sub>37</sub>Cu<sub>13</sub> มีปริมาณลดลงอย่างเด่นชัดเนื่องจากการละลาย



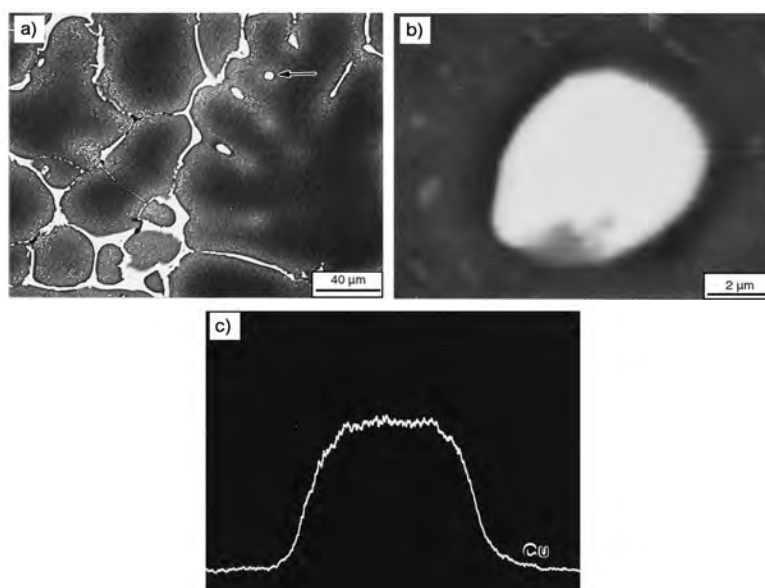
ภาพที่ 2.19 โครงสร้างจุลภาคหลังจากการหล่อ โดยจุด a คือ สารประกอบกลุ่ม Al-Cu-Fe และจุด b คือ สารประกอบกลุ่ม Al-Mg-Zn-Cu



ภาพที่ 2.20 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) จุด a คือ สารประกอบ  $Al_7Cu_2Fe$  และจุด b คือ สารประกอบกลุ่ม Al-Mg-Zn-Cu

ในปี ค.ศ. 2004 Chandan Mondal และคณะ [12] ศึกษาพฤติกรรมของเฟส T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) และเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) ภายในโครงสร้างภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 7055 โดยโลหะผสมอะลูมิเนียม 7055 มีธาตุสังกะสีเป็นส่วนผสมหลักปริมาณ 8% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้มีทองแดงและแมกนีเซียมเป็นส่วนผสมด้วย จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังจากกระบวนการหล่อได้พบโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง

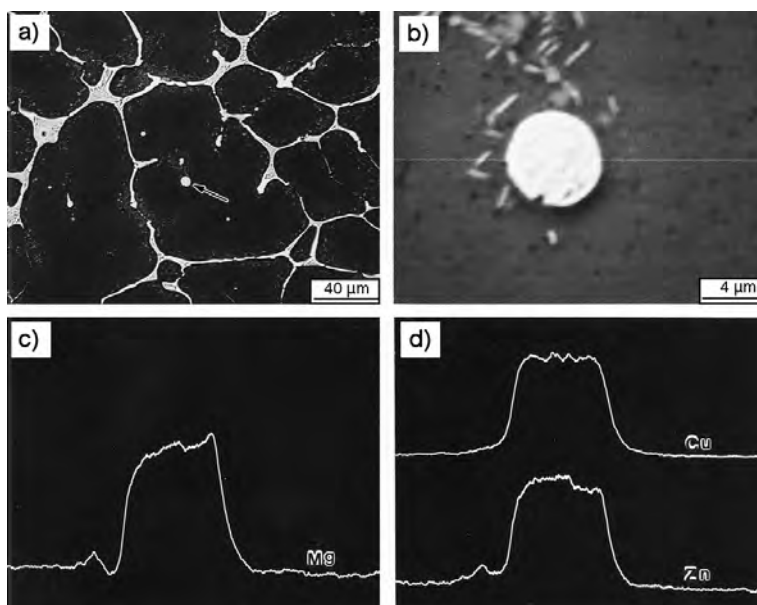
Lamellar และเฟสที่แยกตัวออกมาจากโครงสร้างยูเทคติก จากการตรวจสอบหาสารประกอบด้วยเครื่องมือ X-ray diffraction (XRD) พบเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ), T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ), S ( $Al_2CuMg$ ) และ  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) โดยโครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วยเฟส Al -  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เป็นส่วนใหญ่ โดยเฟส T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) ถูกพบในบริเวณเฟสที่แยกตัวออกมาอยู่ และเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) ถูกพบในปริมาณที่ค่อนข้างน้อยที่บริเวณโครงสร้างยูเทคติก โดยการวิเคราะห์จำแนกเฟสต่างๆ ใช้เทคนิค Wavelength Dispersive X-ray (WDS) ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุต่างๆ ในเฟส



ภาพที่ 2.21 a) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม b) ลักษณะของเฟส T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) ที่แยกตัวออกมาจากโครงสร้างยูเทคติก และ c) line scan ของทองแดง

จากภาพที่ 2.21 แสดงลักษณะของเฟส T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) ที่แยกตัวออกจากโครงสร้างยูเทคติก และ line scan ของทองแดง ซึ่งพบว่าเฟส T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) มีทองแดงละลายอยู่ในเฟสดังกล่าวด้วย โดยมีสังกะสีละลายอยู่ 35-38% โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมละลายอยู่ 20-23% โดยน้ำหนัก ทองแดงละลายอยู่ 27-28% โดยน้ำหนัก และนอกจากนั้นเป็นอะลูมิเนียม เมื่ออัตราส่วนระหว่างทองแดงและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Lattice parameter ของเฟส T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) จะลดลง เนื่องจากทองแดงมีรัศมีอะตอมที่เล็กกว่าแมกนีเซียม และภาพที่ 2.22 แสดงลักษณะของเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) ที่แยกตัวออกจากโครงสร้างยูเทคติก และ line scan ของสังกะสี, ทองแดง และแมกนีเซียม แสดงว่ามีสังกะสีละลายอยู่ในเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) เมื่อปริมาณของธาตุทองแดงและแมกนีเซียมในโลหะผสมเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณของเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) มีปริมาณเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้พบว่าเฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) ไม่มีธาตุแมกนีเซียมและสังกะสีละลายอยู่ใน

เฟสดังกล่าว และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 35 ชั่วโมง พบว่า เฟสที่ยังคงเหลืออยู่คือ เฟส T ( $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ ) ที่มีทองแดงละลายด้วย และเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) ที่ไม่มีสังกะสีละลายอยู่ ซึ่งสังกะสีแพร่ออกจากเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) ระหว่างกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว



ภาพที่ 2.22 a) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม b) ลักษณะของสารประกอบ S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) ที่แยกตัวออกมาจากโครงสร้างยูเทคติก และ c,d) line scan ของ Mg, Cu และ Zn

จากงานวิจัยข้างต้นที่ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม ( $\text{Al-Zn-Mg-Cu}$ ) พบว่า การศึกษาและวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจะวิเคราะห์จากเฟสพื้นฐาน ได้แก่ เฟส T ( $\text{Al-Mg-Zn}$ ), เฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ), เฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) และเฟส  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) ซึ่งการวิเคราะห์และการจำแนกลักษณะของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างในสภาพหลังการหล่อและในสภาพภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม ( $\text{Al-Zn-Mg-Cu}$ ) ยังความไม่ชัดเจน โดยเฟสหลักของโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar ของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบของสังกะสีที่มีปริมาณไม่เกิน 8 wt % จะมีเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะของเฟสดังกล่าวที่น่าเชื่อถือ แต่สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีปริมาณสังกะสีประมาณ 10 wt % การศึกษาเฟสหลักของโครงสร้างยูเทคติกเป็นเฟส T ( $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$ ) จากการศึกษาการวิเคราะห์เฟสดังกล่าวยังไม่มีความน่าเชื่อถือ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณสังกะสีจะมีผลต่อเฟสหลักของโครงสร้างยูเทคติกหรือไม่ เป็นแรงจูงใจในการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมดังกล่าว ซึ่งเฟสต่าง ๆ ที่



เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมมีผลต่อการควบคุมโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะผสม รวมถึงยังส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วย จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาถึงการวิเคราะห์และจำแนกชนิดของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้น รวมถึงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุผสมต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น เพื่อให้มีผลการวิเคราะห์ถึงชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

ในการศึกษางานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์, สารเคมี และเครื่องมือต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ตรวจดูโครงสร้างและศึกษาสารประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานทดสอบ

- อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่

- กระดาษทรายเบอร์ 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 และ 4000

- ผงเพชรขนาด 1 และ 3 ไมครอน

- สารละลาย Keller's agent (water:95 ml + HCl:1.5 ml + HNO<sub>3</sub>:2.5 ml + HF:1 ml)

- กรดฟลูออโบริก (HBF<sub>4</sub>)

- กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) ใช้ศึกษาโครงสร้างและการกระจายตัวของสารประกอบโดยรวมของชิ้นงาน

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ศึกษาลักษณะของสารประกอบต่างๆ รวมทั้งโครงสร้างขนาดเล็ก และโครงสร้างยูเทคติก

- เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อตรวจสอบหาชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

- กล้องจุลทรรศน์ชนิดวิเคราะห์แนวการสะท้อนและเลี้ยวเบนของรังสีอิเล็กตรอน (Electron Probe Microscope Analysis, EPMA) ใช้ศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้าง และวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเฟสต่าง ๆ

- เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุ (Differential Thermal Analyzer, DTA) ใช้ในการตรวจสอบช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาภายในโครงสร้างของชิ้นงาน

### 3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

1. เตรียมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC) ซึ่งสภาวะการหล่อแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อเป็นรูปร่างทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร และนำมาตัดแบ่งชิ้นงานให้เป็นทรงกระบอกสูง 150 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการหล่อด้วยเทคนิค LFEC

Casting Temperature (°C)	730
Casting speed (mm/min)	80
Magnetic field (turns)	80
Frequency (Hz)	25
Current intensity (A)	150

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ศึกษาจำนวน 7 ชิ้น

ชิ้นที่	ส่วนประกอบทางเคมี (wt %)						
	Zn	Mg	Cu	Zr	Si	Fe	Al
1	10.0	2.5	2.3	0.14	0.05	0.05	Bal.
2	10.0	2.5	1.5	0.14	0.05	0.05	Bal.
3	10.0	2.5	1.0	0.14	0.05	0.05	Bal.
4	10.0	1.0	2.3	0.14	0.05	0.05	Bal.
5	10.0	1.5	2.3	0.14	0.05	0.05	Bal.
6	6.4	3.0	1.4	0.14	0.05	0.05	Bal.
7	8.0	2.5	2.5	0.14	0.05	0.05	Bal.

โดยชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองมีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันดังตารางที่ 3.2 และทำเตรียมชิ้นงานหล่อแต่ละส่วนผสมทางเคมีให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกสูง 10 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เพื่อนำชิ้นงานดังกล่าวไปศึกษาต่อไป

## 2. กระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization)

- นำชิ้นงานของแต่ละส่วนประกอบทางเคมีที่เตรียมไว้ นำมาผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ที่อุณหภูมิ 460 °C โดยเป็นอุณหภูมิที่เกิดเฟสส่วนใหญ่ เพื่อให้เกิดการละลายของเฟสภายในโครงสร้างเข้าสู่โครงสร้างพื้น โดยใช้ระยะเวลาแตกต่างกัน ดังนี้ 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที หลังจากนั้นจุ่มลงในน้ำอย่างรวดเร็ว (Water quench) รวมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวทั้งหมด 35 ชิ้น

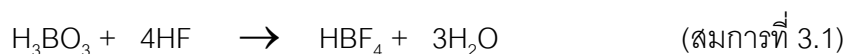
## 3. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

- นำชิ้นงานหลังจากการหล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC) จำนวน 7 ชิ้น ที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน รวมถึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) มาเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคมาเตรียมพื้นผิวชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษเบอร์ 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 และ 4000 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำมาขัดพื้นผิวอย่างละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 3 ไมครอน และ 1 ไมครอน ตามลำดับ

- นำชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงาน กัดผิวหน้าชิ้นงานด้วย Keller's agent (water: 95 ml + HCl: 1.5 ml + HNO<sub>3</sub>: 2.5 ml + HF: 1 ml) [5] ซึ่งเจือจางความเข้มข้นลง 10 เท่าด้วยน้ำกลั่น (เวลาในการกัดผิว 3 วินาที) หลังจากนั้นนำไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope, OM) เพื่อตรวจดูโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน และสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างอย่างละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ทั้งในรูปแบบของ Secondary Electron Image และ Backscatter Electron Image ชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบจะไม่ผ่านขั้นตอนการกัดกรด

## 4. การวัดขนาดของเกรนภายในโครงสร้าง

- นำชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานกัดด้วยกรดฟลูออโบริก (HBF<sub>4</sub>) [5] ซึ่งได้จากการผสมสารเคมีดังนี้คือ กรดบอริก (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) กับกรดไฮโดรฟลูอออริก (HF) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โมล ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผลลัพท์เป็นกรดฟลูออโบริก ซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังนี้



จากนั้น นำกรดฟลูออโบริก ( $\text{HBF}_4$ ) ที่ได้ไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 17 : 1000 มิลลิลิตรตามลำดับ ( $\text{HBF}_4$  17 มิลลิลิตร ต่อ น้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร) แล้วจึงนำมากัดผิวหน้าชิ้นงานเป็นเวลา 2 นาที ล้างด้วยน้ำและเป่าให้แห้ง

- นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดที่ผิวหน้าของชิ้นงานไปวัดขนาดเกรนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM)

- วัดขนาดของเกรนด้วยวิธีวัดจำนวนเกรนบนเส้นตรง [13] โดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่ารูปร่างของเกรนมีลักษณะกลม หรือเรียกว่า เกรนด้านเท่า (Equiaxed Grain) ซึ่งมีวิธีการวัดสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ลากเส้นตรงอย่างสุ่ม 1 เส้นลงบนภาพโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) ที่กำลังขยายใด ๆ โดยวัดความยาวเส้นตรงและนับจำนวนเกรนที่เส้นตรงนั้นตัดผ่าน

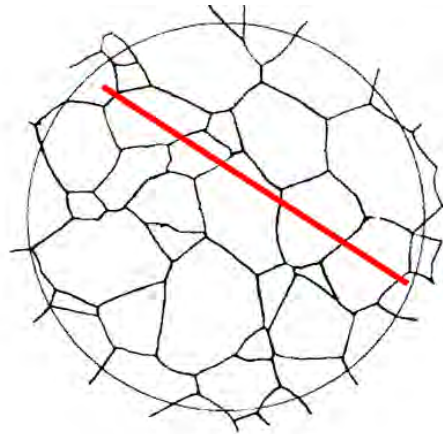
2) คำนวณหาค่าจำนวนเกรนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเส้นทดสอบ ( $N_L$ ) จากสมการที่ 3.2

$$N_L = \frac{\text{จำนวนเกรนบนเส้นทดสอบ}}{(\text{ความยาวจริงของเส้นทดสอบ} \div \text{กำลังขยายของภาพ})} \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

3) จากสมมุติฐานทางเรขาคณิตที่ว่าเกรนทุกเกรนมีขนาดเท่ากันและใกล้เคียงทรงกลมมากที่สุด เราสามารถคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของเกรน (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยหรือ D) จากสมการที่ 3.3

$$D = \frac{3}{2N_L} \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

ตัวอย่าง ลากเส้นผ่านโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่า ซึ่งนับเกรนที่เส้นตรงลากผ่านได้ 6 เกรน โดยที่ความยาวเส้นตรงนี้วัดได้ 3.0 ซม.



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างการวัดขนาดเกรนแบบเส้นตรง

จำนวนเกรนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเส้นทดสอบ ( $N_L$ )

$$N_L = \frac{6}{(3.0 / 500)}$$

$$= 1000 \quad \text{เกรน/ซม.}$$

ดังนั้น ขนาดเฉลี่ยของเกรน (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยหรือ D) จะได้

$$D = \frac{3}{2(1000)}$$

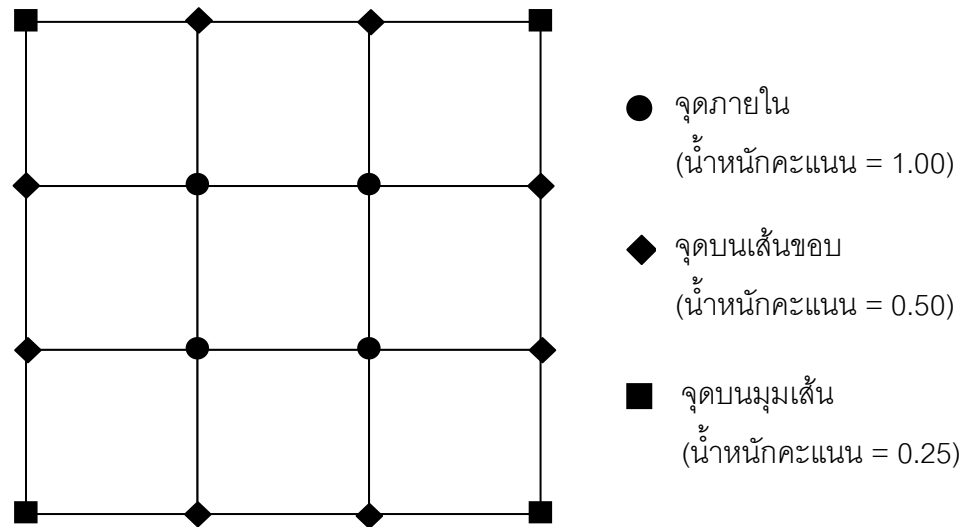
$$= 0.0015 \quad \text{ซม.} \quad \dots\dots\dots\text{ตอบ}$$

#### 5. การตรวจหาปริมาณโครงสร้างยูเทคติกของชิ้นงาน

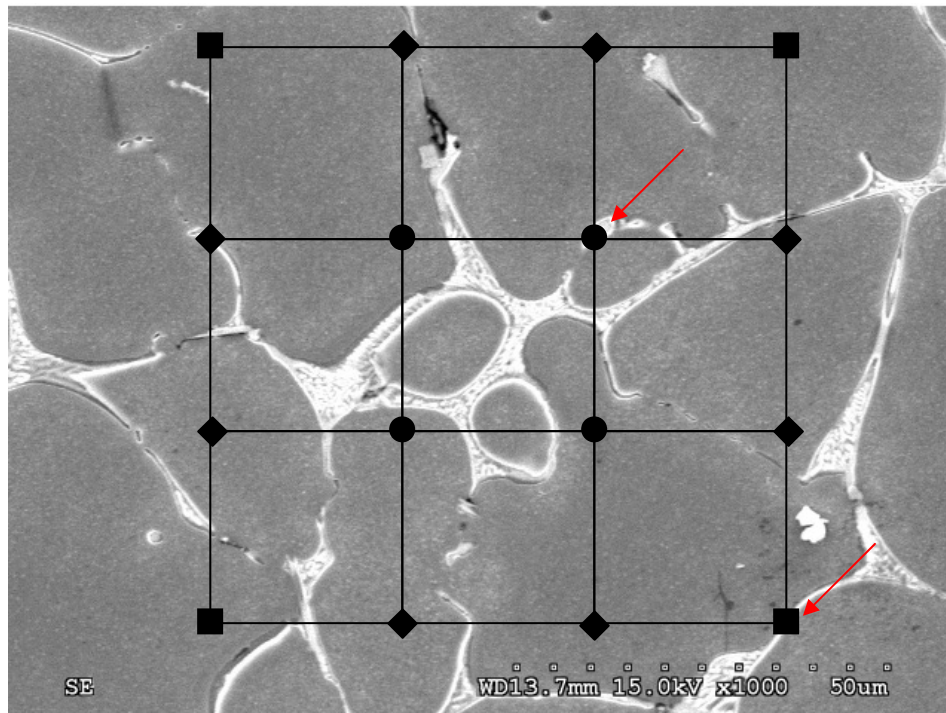
- นำชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงาน ตรวจหาปริมาณสัดส่วนพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกด้วยวิธี Quantitative Analysis แบบ Point Counting ในบริเวณต่าง ๆ กัน ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า

- โดยวิธีตรวจวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติกแบบ Point Counting มีขั้นตอนดังนี้

1) สร้างรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4 X 4 ตารางเซนติเมตร จำนวน 9 ช่อง และระบุจุดย่อยลงบนภาพภายในพื้นที่สี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การกำหนดจุดของแผนภาพที่ใช้ในการวัดปริมาณของโครงสร้างยูเทคติก



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติก

2) กำหนดน้ำหนักของคะแนนแต่ละจุดของแผนภาพที่อธิบายดังภาพที่ 3.2 โดยเมื่อวางแผนภาพลงบนโครงสร้างจุลภาคที่แสดงภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) จุดที่กำหนดวางทับบนโครงสร้างยูเทคติกให้นับคะแนนเป็น 1 ดังลูกศรสีแดงแสดงในภาพที่ 3.3 แล้วนำผลคะแนนที่นับได้ไปคูณกับน้ำหนักของคะแนนแต่ละจุด แล้วนำคะแนนที่นับในแต่ละ

ครั้งมาหารด้วย 9 (คือ คะแนนรวมทั้งหมดของจุดในหนึ่งครั้ง) โดยค่าที่คำนวณได้เป็นส่วนพื้นที่ โครงสร้างยูเทคติกต่อโครงสร้างพื้น

- ในการตรวจวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติกจะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมา คำนวณจำนวนครั้งในการใช้วัดปริมาณยูเทคติก ในงานวิจัยนี้ใช้ประมาณ 100 ครั้งในการวัด แล้ว นำมาหาค่าเฉลี่ยของสัดส่วนพื้นที่โครงสร้างยูเทคติกต่อโครงสร้างพื้น แล้วแปลงค่าเป็นร้อยละของ พื้นที่โครงสร้างยูเทคติก

6. นำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นงาน

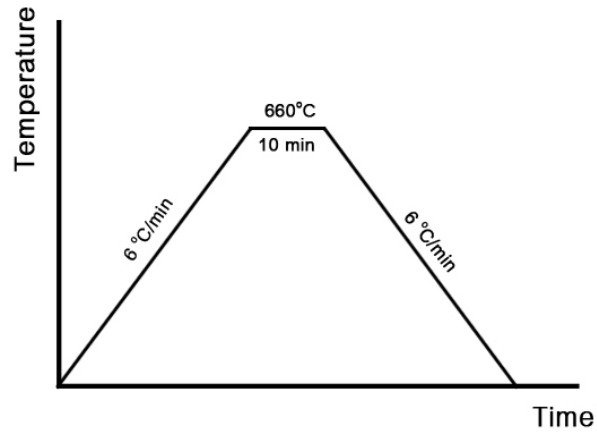
7. นำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดวิเคราะห์แนวการ สะท้อนและเลี้ยวเบนของรังสีอิเล็กตรอน (Electron probe microscope analysis, EPMA) เพื่อ ศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในบริเวณของโครงสร้างภายในของชิ้นงาน และตรวจวัด ส่วนประกอบทางเคมีของเฟสต่าง ๆ

8. การศึกษาลำดับการเกิดเฟสต่าง ๆ ภายในชิ้นงาน

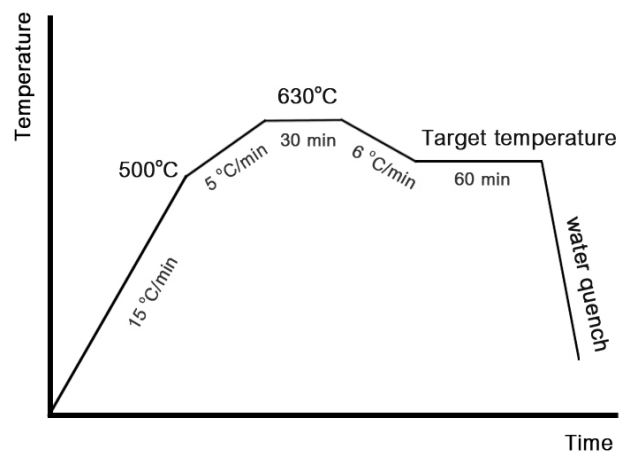
- นำชิ้นงานทั้งหมดไปตรวจสอบช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายใน โครงสร้างของชิ้นงานระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุ (Differential Thermal Analyzer, DTA) โดยตั้งโปรแกรมการทำงานของเครื่องมือตามแผนภูมิ แสดงดังภาพที่ 3.4

- ศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สนใจจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง วิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุ (Differential Thermal Analyzer, DTA) ด้วยวิธีการ Interrupt Solidification เป็นการตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยการอบชิ้นงานตามแผนภูมิแสดงดัง ภาพที่ 3.5 โดยนำชิ้นงานเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 630 องศา เซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วคงชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิ 630 องศาเซลเซียส เป็น ระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่สนใจ แล้วคงชิ้นงานที่อุณหภูมิ ดังกล่าวเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตาแล้วทำการจุ่มลงในน้ำอย่างรวดเร็ว และนำชิ้นงานดังกล่าวไปวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของชิ้นงาน





ภาพที่ 3.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุ (Differential Thermal Analyzer, DTA)



ภาพที่ 3.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของวิธีการ Interrupt solidification

- นำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Thermo-Calc ที่คำนวณการแข็งตัวของน้ำโลหะด้วยสมการ Scheil's Equation

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์การทดลอง

#### 4.1 โครงสร้างของโลหะอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อ

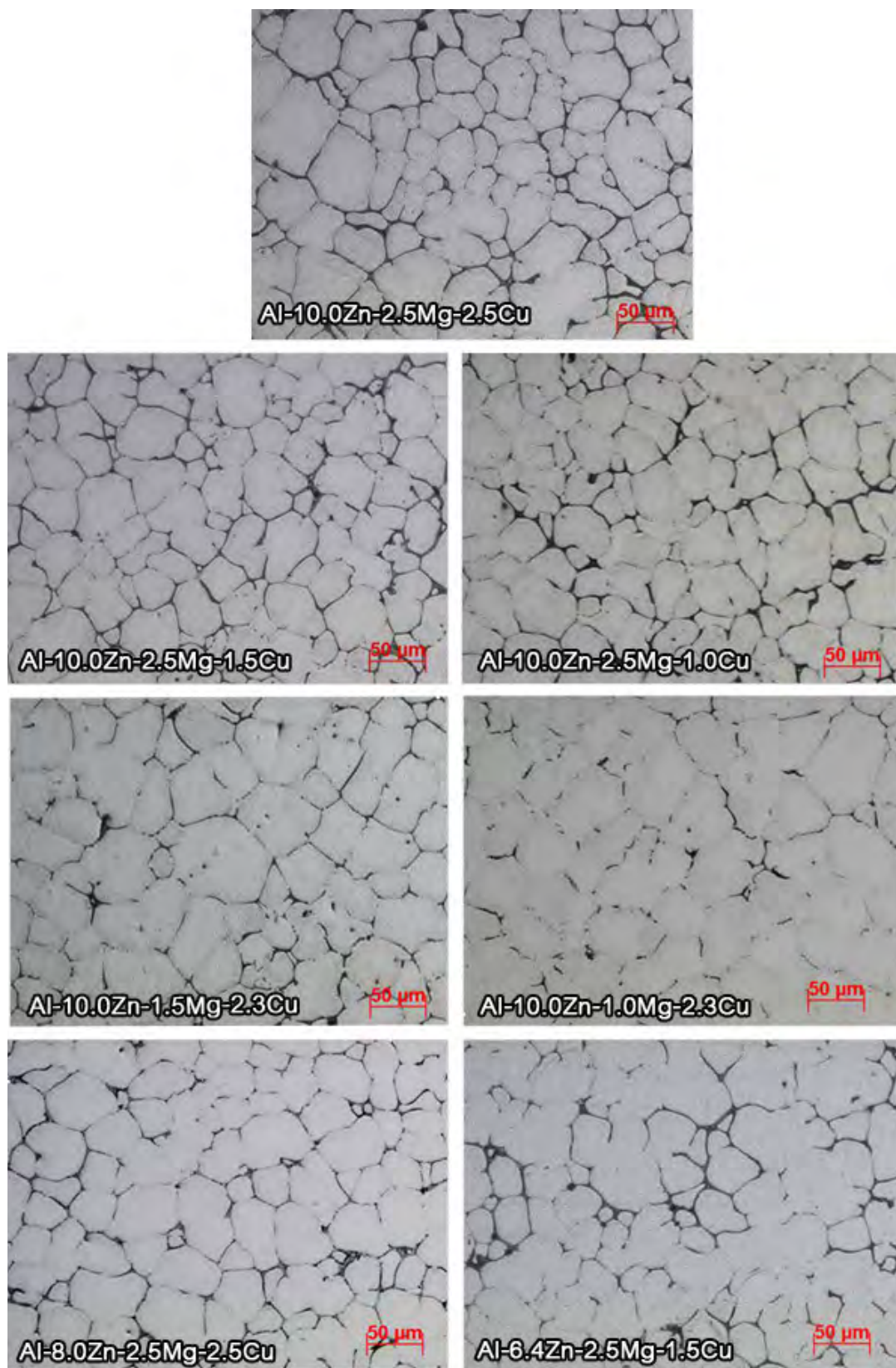
##### 4.1.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการหล่อ

ในการศึกษาโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อจะศึกษาโครงสร้างจุลภาค, ขนาดเกรนภายในโครงสร้าง และปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีปริมาณสังกะสี, แมกนีเซียม และทองแดงแตกต่างกัน

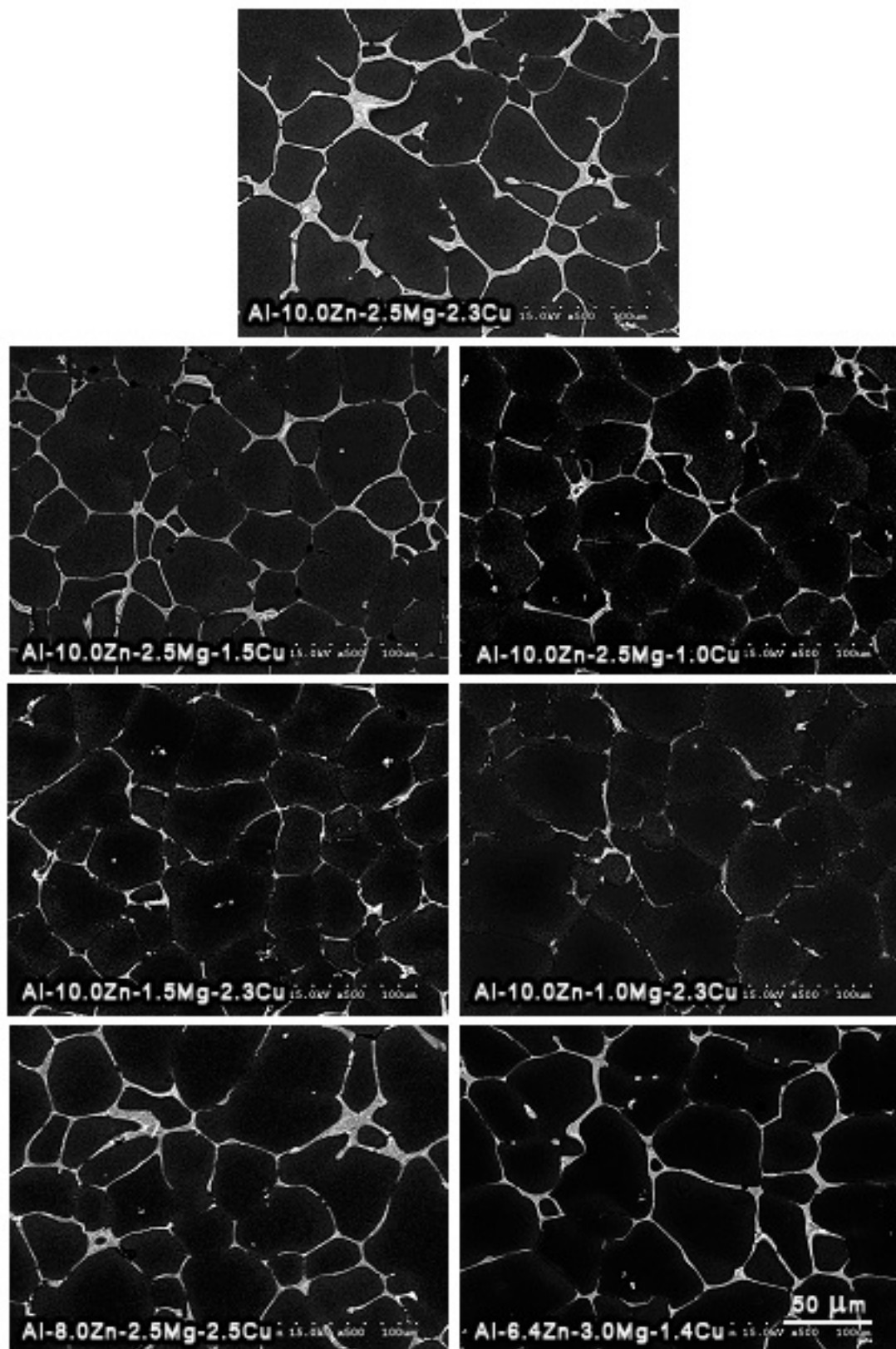
##### 4.1.1.1 โครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการหล่อ

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อด้วยเทคนิค LFEC ที่ศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงแสดงดังภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงขนาดเกรนภายในโครงสร้างมีขนาดละเอียดและมีขนาดที่ใกล้เคียงกันทุกส่วนประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการหล่อที่ศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแบบวิธี Backscattered Electron Image ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า โดยบริเวณสีเข้มเป็นสารละลายของแข็งของอะลูมิเนียม และบริเวณสีอ่อนเป็นโครงสร้างยูเทคติก โดยสารประกอบส่วนใหญ่ภายในโครงสร้างเกิดจากปฏิกิริยายูเทคติก ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลมาจากส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อปริมาณธาตุผสมลดลง โครงสร้างยูเทคติกลดลงด้วย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4.1 โดยเฉพาะเมื่อปริมาณของแมกนีเซียมลดลงสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างยูเทคติกลดลงอย่างเด่นชัด

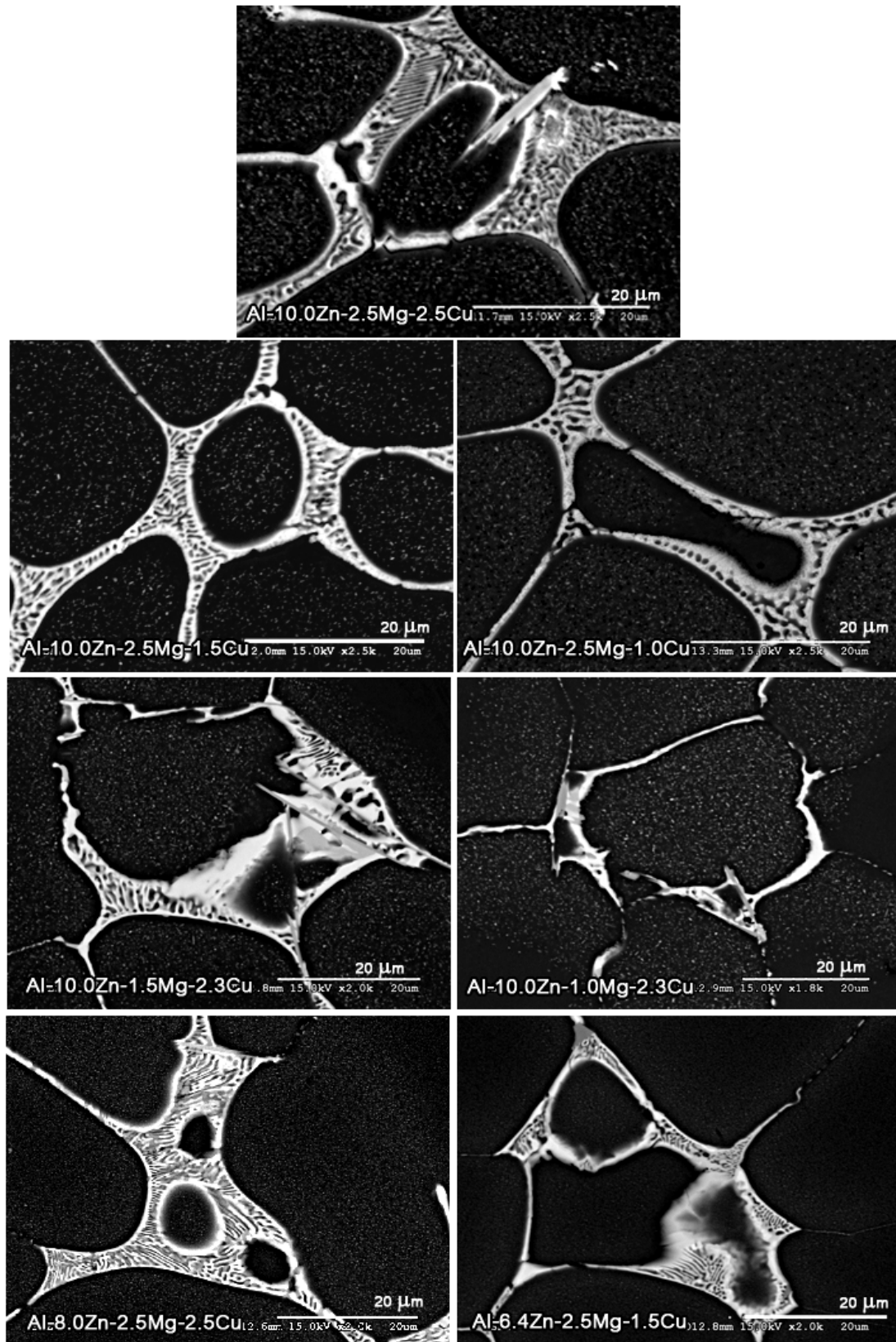
และภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างยูเทคติกที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ว่าโครงสร้างยูเทคติกส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar สำหรับชนิดของเฟสที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างจะขอกว่าในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง



ภาพที่ 4.2 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน



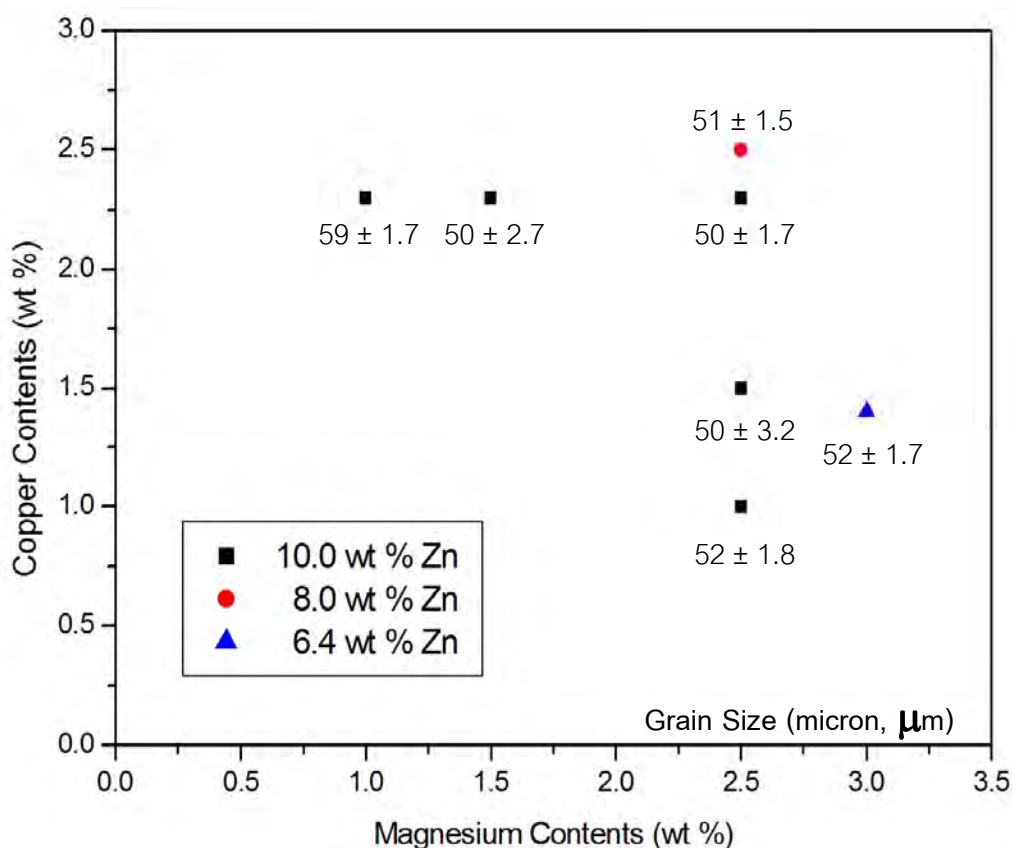
ภาพที่ 4.3 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงแสดงโครงสร้างจุลภาคภายใต้กระบวนการหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

#### 4.1.1.2 ขนาดเกรนภายหลังกระบวนการหล่อ

ในการศึกษาขนาดเกรนภายในโครงสร้างใช้วิธีการวัดแบบเส้นตรงดังที่กล่าวในบทที่ 3 ขนาดเกรนภายในโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 4.1 และการเปรียบเทียบขนาดเกรนกับส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมแสดงดังภาพที่ 4.4 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นว่าขนาดเกรนภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิค LFEC นี้มีขนาดเกรนโดยเฉลี่ย 50 ไมครอน ซึ่งส่วนใหญ่มีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อลดปริมาณของธาตุแมกนีเซียมลงเป็น 1.0 % โดยน้ำหนัก ขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นเป็น 59 ไมครอน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าขนาดเกรนภายในโครงสร้างของโลหะจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของกระบวนการหล่อโลหะ มากกว่าส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มเดียวกันที่หล่อด้วยเทคนิค Direct Chill (DC) [14] ซึ่งพบว่าเกรนจะมีขนาดเกรนแตกต่างกัน มีขนาดเกรนตั้งแต่ 20-120 ไมครอน จากตำแหน่งขอบชิ้นงานถึงใจกลางชิ้นงานตามลำดับ โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่หล่อด้วยเทคนิค Low Frequency Electromagnetic Casting (LFEC) มีขนาดเกรนใกล้เคียงกันทั่วชิ้นงาน [15] ดังนั้นเทคนิคของการหล่อก็มีผลในการควบคุมขนาดของเกรนมากกว่าปัจจัยด้านส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

ชั้นที่	ส่วนประกอบทางเคมี (wt %)				ขนาดเกรนภายในโครงสร้าง ( $\mu\text{m}$ )
	Zn	Mg	Cu	Al	
1	10.0	2.5	2.3	Bal.	50 $\pm$ 1.7
2	10.0	2.5	1.5	Bal.	50 $\pm$ 3.2
3	10.0	2.5	1.0	Bal.	52 $\pm$ 1.8
4	10.0	1.5	2.3	Bal.	50 $\pm$ 2.7
5	10.0	1.0	2.3	Bal.	59 $\pm$ 1.7
6	8.0	2.5	2.5	Bal.	51 $\pm$ 1.5
7	6.4	3.0	1.4	Bal.	52 $\pm$ 1.7



ภาพที่ 4.4 แผนภูมิเปรียบเทียบขนาดเกรนภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

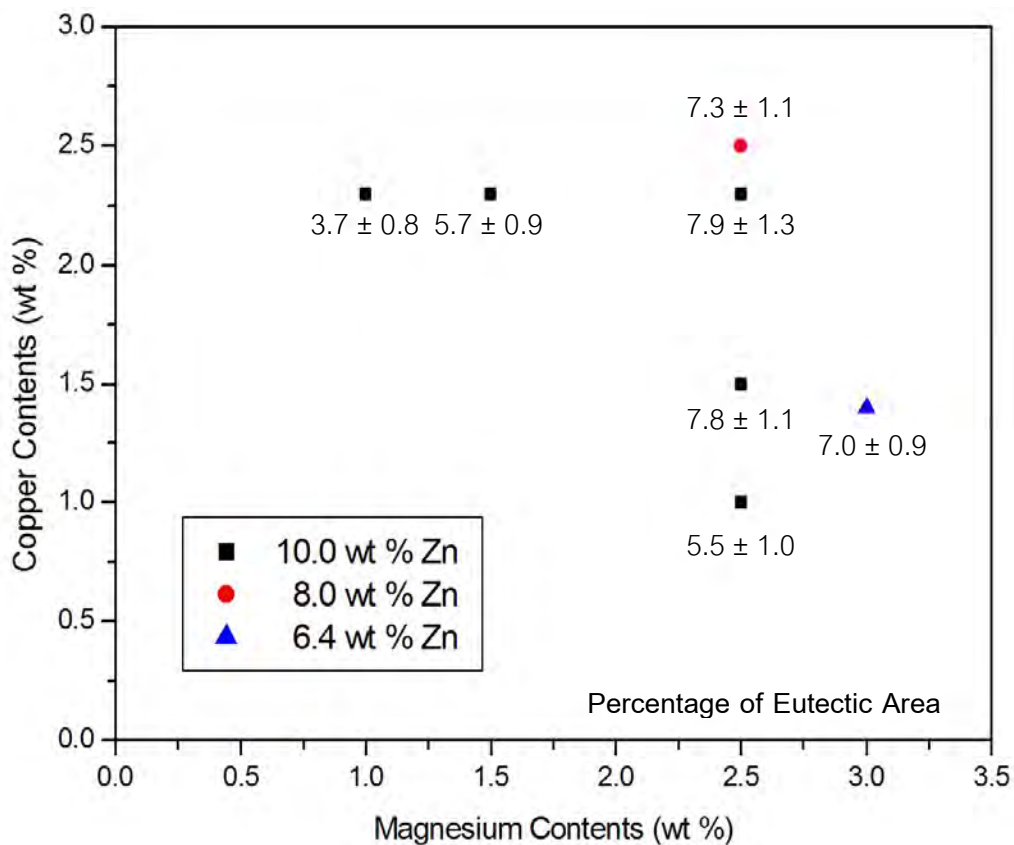
#### 4.1.1.3 ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายหลังกระบวนการหล่อ

การวัดปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกใช้วิธีการวัดแบบ Point counting ซึ่งหน่วยในการวัดปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกเป็นร้อยละโดยพื้นที่ (Percentage of area) โดยผลการวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติกแสดงดังตารางที่ 4.2 และการเปรียบเทียบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกกับส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมแสดงดังภาพที่ 4.5 จากผลการวัดปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกลดลงตามปริมาณของธาตุผสมภายในโลหะผสม ซึ่งสอดคล้องกับภาพของโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยปริมาณของธาตุแมกนีเซียมในโลหะผสมอะลูมิเนียมลดลง ทำให้โครงสร้างยูเทคติกลดลงอย่างเห็นเด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบกับ การลดลงของปริมาณทองแดงและสังกะสี ซึ่งน้ำหนักอะตอมของแมกนีเซียม, ทองแดง และสังกะสีเท่ากับ 24.31, 63.55 และ 65.39 กรัมต่ออะตอม ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักอะตอมของแมกนีเซียมน้อยกว่าทองแดงและสังกะสีมาก เมื่อลดปริมาณของธาตุผสมในปริมาณของร้อยละโดยน้ำหนักที่เท่ากันแล้วปริมาณของอะตอมของแมกนีเซียมจะลดลงมากกว่าการลดปริมาณของธาตุทองแดงและ

สังกะสี จึงทำให้ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกลดลงอย่างเด่นชัดเมื่อลดปริมาณของธาตุแมกนีเซียมลง

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายใต้กระบวนการหล่อที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

ชั้นที่	ส่วนประกอบทางเคมี (wt %)				ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติก (Percentage of Eutectic area)
	Zn	Mg	Cu	Al	
1	10.0	2.5	2.3	Bal.	$7.9 \pm 1.3$
2	10.0	2.5	1.5	Bal.	$7.8 \pm 1.1$
3	10.0	2.5	1.0	Bal.	$5.5 \pm 1.0$
4	10.0	1.5	2.3	Bal.	$5.7 \pm 0.9$
5	10.0	1.0	2.3	Bal.	$3.7 \pm 0.8$
6	8.0	2.5	2.5	Bal.	$7.3 \pm 1.1$
7	6.4	3.0	1.4	Bal.	$7.0 \pm 0.9$



ภาพที่ 4.5 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายใต้กระบวนการหล่อที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน



ในการวัดขนาดของเกรนและวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติกจะใช้สูตรทางสถิติเพื่อคำนวณช่วงของค่าการวัดเพื่อความถูกต้องของค่าการวัดมากขึ้น โดยใช้สูตร 95 % Confidence Limits หมายถึงช่วงค่าการวัดดังกล่าวมีความถูกต้อง 95%

#### 4.1.2 การศึกษาเฟสทุติยภูมิภายในโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อ

ในการวิเคราะห์เฟสทุติยภูมิ (Secondary phase) ภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่มีส่วนประกอบหลักของอะลูมิเนียม (Al), สังกะสี (Zn), แมกนีเซียม (Mg) และทองแดง (Cu) ภายหลังกระบวนการหล่อ โลหะผสมอะลูมิเนียมจะมีธาตุมลทินเป็นส่วนประกอบเล็กน้อยได้แก่ เหล็ก (Fe) และซิลิคอน (Si) ซึ่งชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการวิจัยนี้มีส่วนประกอบของเหล็กและซิลิคอนอย่างละ 0.05 % โดยน้ำหนัก โดยการศึกษาและวิเคราะห์เฟสทุติยภูมิภายในโครงสร้างจะพิจารณาจากเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ), T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ), S ( $Al_2CuMg$ ),  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ),  $Al_7Cu_2Fe$ ,  $Mg_2Si$  และ  $Al_3Zr$  ซึ่งเฟสต่าง ๆ เหล่านี้เป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์สารประกอบภายในโครงสร้าง โดยเฟสต่าง ๆ เหล่านี้ได้มาจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX และเฟสไดอะแกรมของธาตุผสมที่เกี่ยวข้อง

ในการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีเทคนิคแตกต่างกันในการวิเคราะห์ โดยใช้เครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) และ Electron Probe Microscope Analyzer (EPMA) เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์เฟสภายในโครงสร้าง นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบเฟสต่าง ๆ ในเบื้องต้นภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยวิธีฉายภาพแบบ Backscatter Electron Image (BSE) ซึ่งหลักการของการฉายภาพแบบนี้สามารถจำแนกเฟสต่าง ๆ ได้ในเบื้องต้น เพราะภาพที่ได้ออกมาจะแปรผลมาจากปริมาณของ Backscattered Electron โดยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะให้ภาพที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า โดยลำอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของอะตอม โดยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าขนาดของนิวเคลียสจะใหญ่กว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า ซึ่งโอกาสที่อิเล็กตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขอะตอมสูงมีโอกาสมากกว่า และทำให้มี Backscattered electron วิ่งกลับเข้าสู่ตัวรับสัญญาณในจำนวนที่มากกว่าจึงเป็นสาเหตุทำให้สัญญาณภาพของเฟสที่มีค่าเลขอะตอมสูงกว่ามีความสว่างมากกว่าเฟสที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมของชนิดของเฟสที่จะวิเคราะห์เฟสภายในโครงสร้างโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-Zn-Mg-Cu แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าเฟส  $\alpha$  (Al) จะมีเลข

อะตอมที่ต่ำซึ่งจะเห็นภาพที่มีดเมื่อเปรียบเทียบกับเฟสส่วนใหญ่ในภาพ BSE ของโครงสร้างจุลภาคที่แสดงดังภาพที่ 4.2 และเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ที่มีค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมสูงสุดตั้งนั้นในภาพ BSE จะสามารถเห็นเฟสนี้ที่มีความสว่างที่สุด

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมของเฟสชนิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของเฟสภายในโครงสร้าง

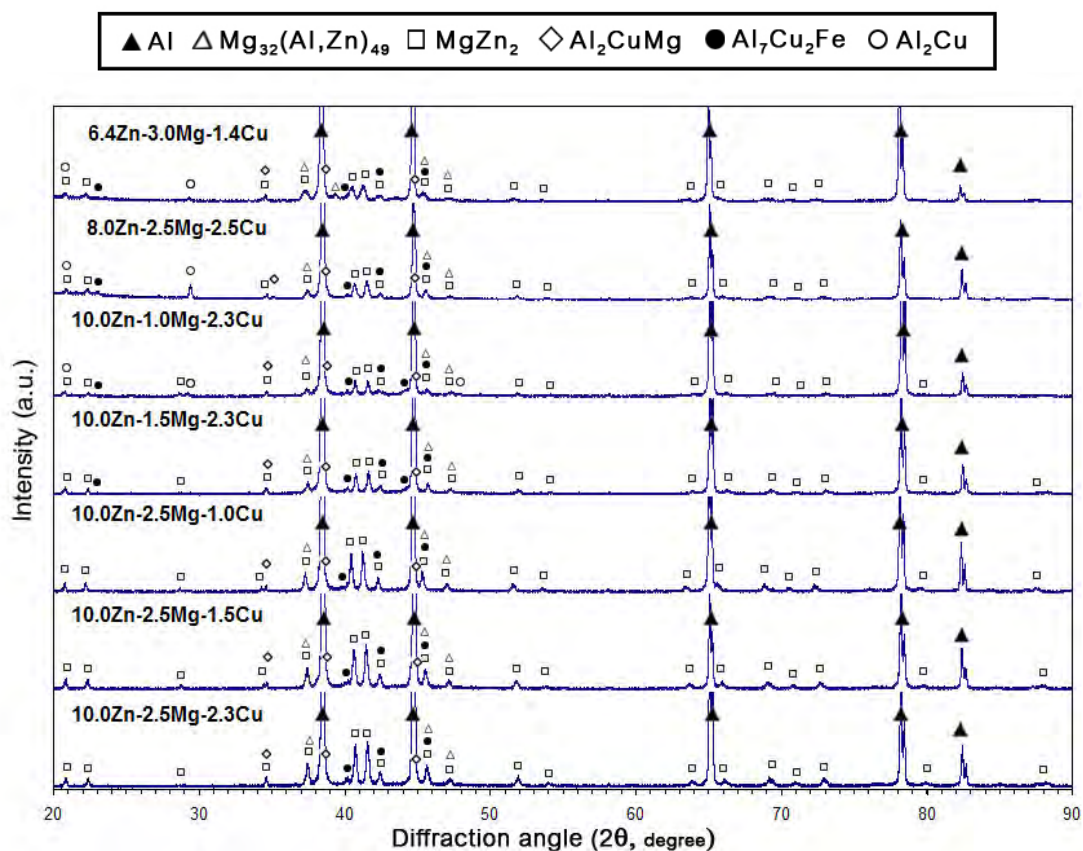
Phase	Average of Atomic Number	Phase	Average of Atomic Number
$MgZn_2$	24.0	$Al_7Cu_2Fe$	17.5
$Al_3Zr$	19.8	$Al_2CuMg$	16.8
$Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$	19.2	Al	13.0
$Al_2Cu$	18.3	$Mg_2Si$	12.7

#### 4.1.2.1 X-Ray Diffractometer (XRD)

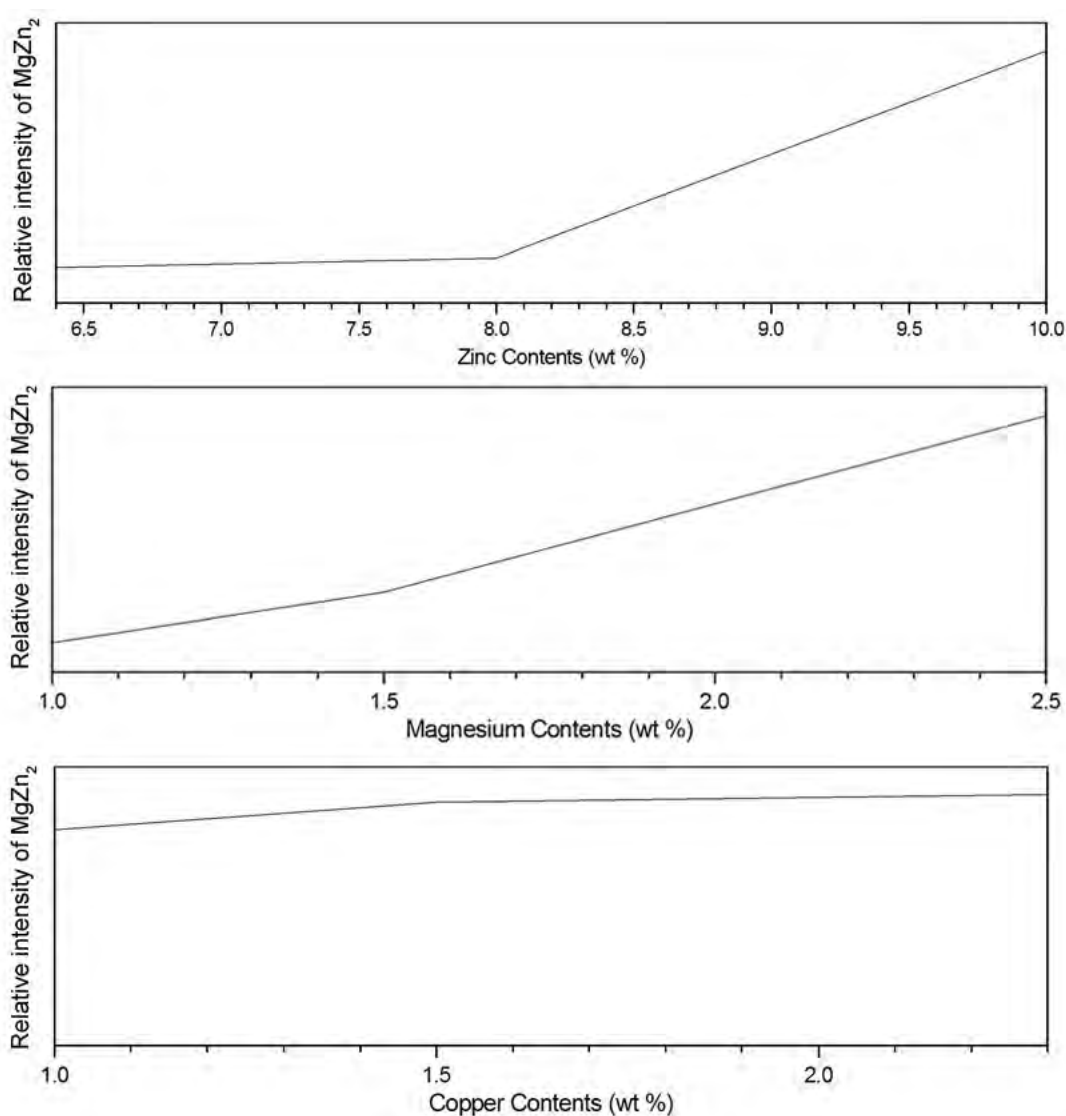
จากการนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่อยู่ภายในโครงสร้างของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยกำหนดความเร็วของการสแกนของรังสีเอกซ์ (Scan speed) เท่ากับ 0.5 องศาต่อวินาที จากภาพที่ 4.6 แสดง X-Ray Diffraction Patterns ของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันภายหลังกระบวนการหล่อ จากผลจากวิเคราะห์จาก X-Ray Diffraction Patterns พบว่าทุกชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม สามารถตรวจพบเฟส Al ซึ่งเป็นโลหะหลักของชิ้นงาน และตรวจพบเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ในโครงสร้างของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมทุกชิ้นงาน ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมมีเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เป็นเฟสหลักของโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar

นอกจากนี้จาก Diffraction Patterns ยังตรวจสอบพบเฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ),  $Al_7Cu_2Fe$ , S ( $Al_2CuMg$ ) และ T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) ในโครงสร้างของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  สามารถตรวจพบในทุกชิ้นงาน ซึ่งเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) สามารถตรวจพบในทุกชิ้นงานเช่นกัน แต่พีค (Peak) ของเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) บางชิ้นงานเป็นพีคเดียว พบในชิ้นงาน Al-10.0Zn-2.5Mg-1.5Cu, Al-10.0Zn-2.5Mg-1.0Cu และ Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu แต่สำหรับชิ้นงานที่เหลือพบเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) เป็นพีคซ้อนกับเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ส่วนเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) พบเจอในทุกชิ้นงาน โดยชิ้นงาน Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu พบพีคของเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) ซึ่งมีอัตราส่วนของ

แมกนีเซียมต่อสังกะสีสูงสุด นอกจากนั้นพบพีคของเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) เป็นพีคซ้อนทับกับเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) และเฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) พบเฉพาะในชิ้นงาน Al-10.0Zn-1.0Mg-2.5Cu, Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu และ Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีปริมาณสังกะสี 10.0 wt % โดยชิ้นงาน Al-10.0Zn-1.0Mg-2.5Cu ตรวจพบเฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) ในชิ้นงานเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีปริมาณสังกะสี 10.0 wt % เพราะมีอัตราส่วนของปริมาณทองแดงต่อแมกนีเซียมสูงที่สุด และเมื่อลดปริมาณของสังกะสีลงก็สามารถตรวจพบเฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) เช่นเดียวกัน สำหรับการตรวจสอบเฟสภายในโครงสร้างด้วย XRD นี้ การไม่พบพีคของเฟสใน Diffraction Patterns ไม่ได้หมายความว่าไม่มีเฟสดังกล่าวภายในโครงสร้าง อาจมีปริมาณปริมาณของเฟสที่น้อยมากจึงไม่สามารถตรวจพบได้ และสำหรับการตรวจพบเฟสในรูปของพีคที่ซ้อนกันต้องตรวจสอบด้วยเครื่องมืออื่น ๆ ประกอบด้วย



ภาพที่ 4.6 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันภายหลังกระบวนการหล่อ



ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เชิงคุณภาพของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมี (สังกะสี, ทองแดง และแมกนีเซียม) แตกต่างกัน

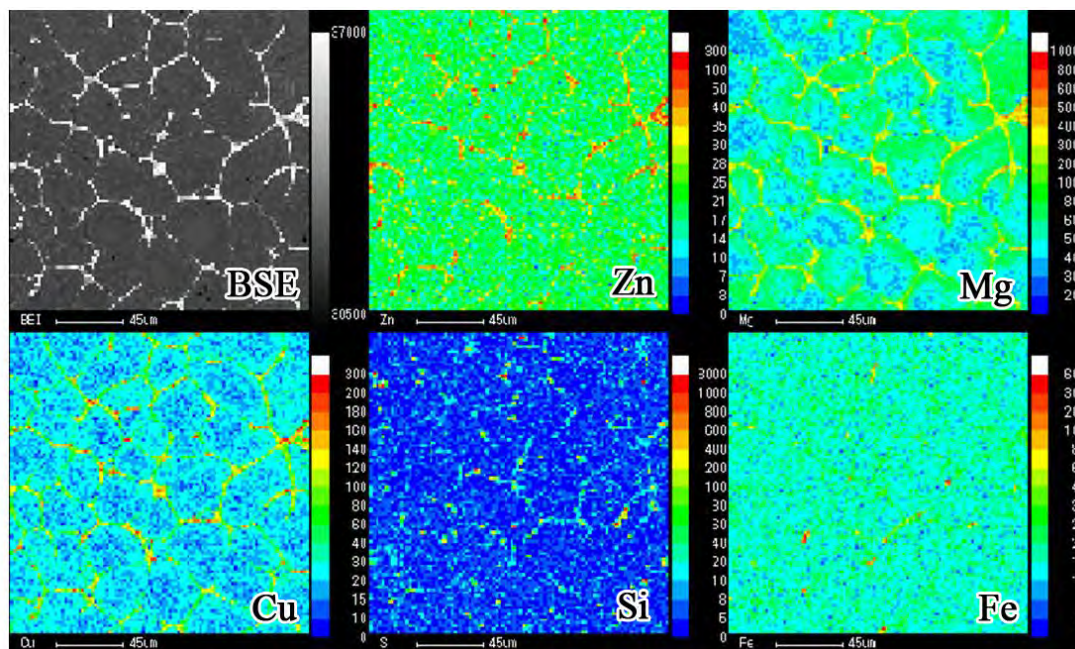
ในการเปรียบเทียบปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เชิงคุณภาพแสดงดังภาพที่ 4.7 โดยปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) จำกัดนิยามโดยใช้ Relative Intensities จาก Diffraction patterns ดังสมการที่ 4.1 โดยค่า Intensity ของพีคที่ปรากฏใน X-ray diffraction patterns จะขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟสนั้นภายในโลหะผสม แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง Intensity กับปริมาณของเฟสไม่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง เพราะยังมีแฟกเตอร์ Absorption coefficient ของสารผสมซึ่งยังมีผลต่อค่า Intensity ของพีคด้วย [16] โดยในที่นี้เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) จะถือว่าค่า Absorption coefficient ของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะจาก Diffraction patterns ของชิ้นงานมีลักษณะที่คล้ายกัน

$$\text{Relative intensity of MgZn}_2 \equiv C_{\text{MgZn}_2}^{201} / C_{\text{Al}}^{111} \times 100\% \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

จากภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) ซึ่งคุณภาพของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมี (สังกะสี, ทองแดง และแมกนีเซียม) แตกต่างกัน โดยเมื่อปริมาณของสังกะสี, ทองแดง และแมกนีเซียม ในโลหะผสมอะลูมิเนียมมีปริมาณที่ลดลง ทำให้ปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) ลดลง

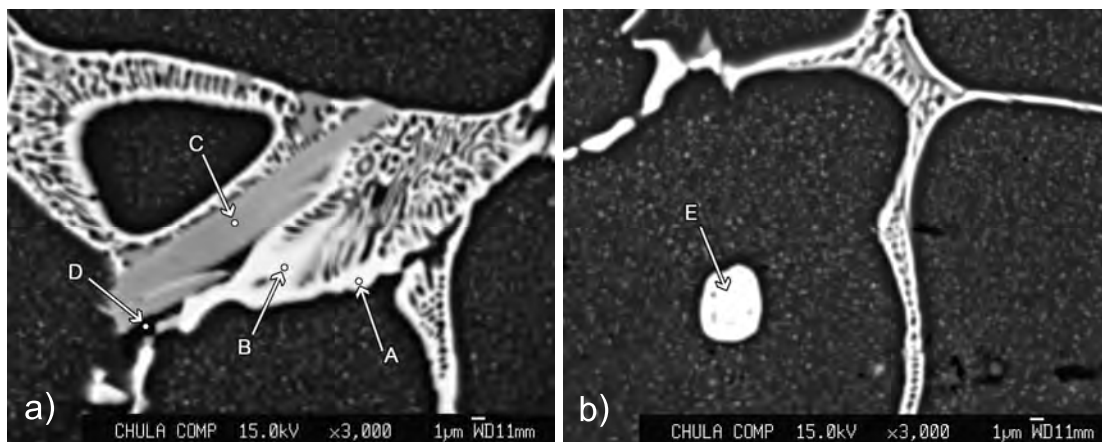
#### 4.1.2.2 Electron Probe Microscope Analyzer (EPMA)

ในการตรวจสอบเฟสด้วยเครื่อง Electron Probe Microscope Analyzer (EPMA) โดยกำหนด Accelerating Voltage เท่ากับ 10 kV, Sample Current เท่ากับ 0.07  $\mu\text{A}$  และ Electron Beam Diameter เท่ากับ 1  $\mu\text{m}$



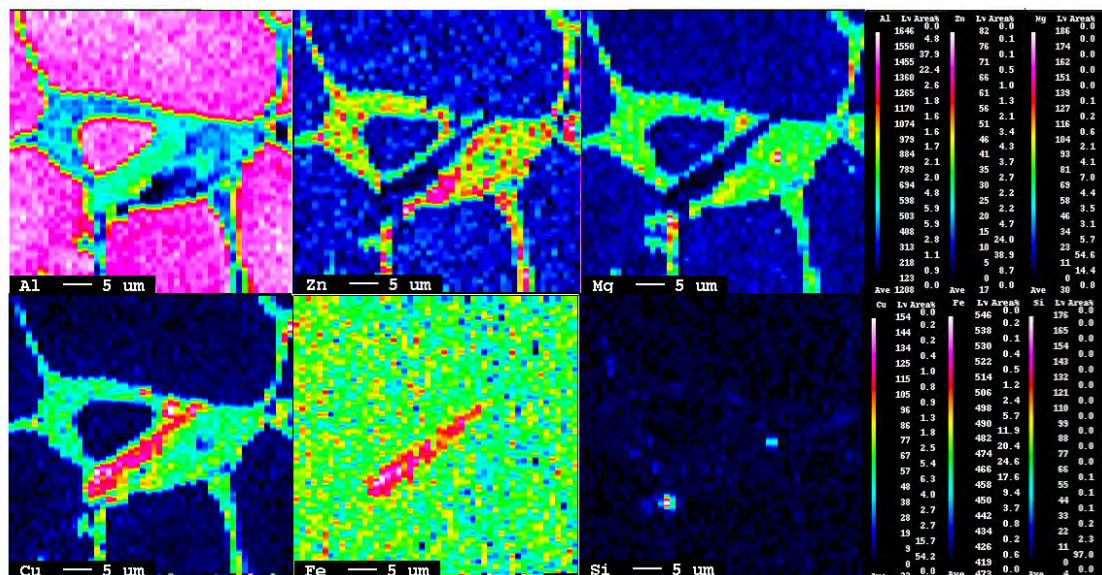
ภาพที่ 4.8 X-Ray Maps ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu

จากการตรวจสอบเฟสในโครงสร้างด้วย XRD พบว่าเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) เป็นเฟสทุติยภูมิ (Secondary phase) หลักของโครงสร้างยูเทคติก จากนั้นนำไปตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างด้วยเครื่อง EPMA ด้วยเทคนิค Mapping Analysis พบว่าสังกะสี, ทองแดง และแมกนีเซียม มีปริมาณหนาแน่นอยู่บริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นบริเวณของโครงสร้างยูเทคติก ดังภาพที่ 4.8 ซึ่งแสดงว่าเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) มีทองแดงละลายอยู่ในเฟสดังกล่าวด้วย



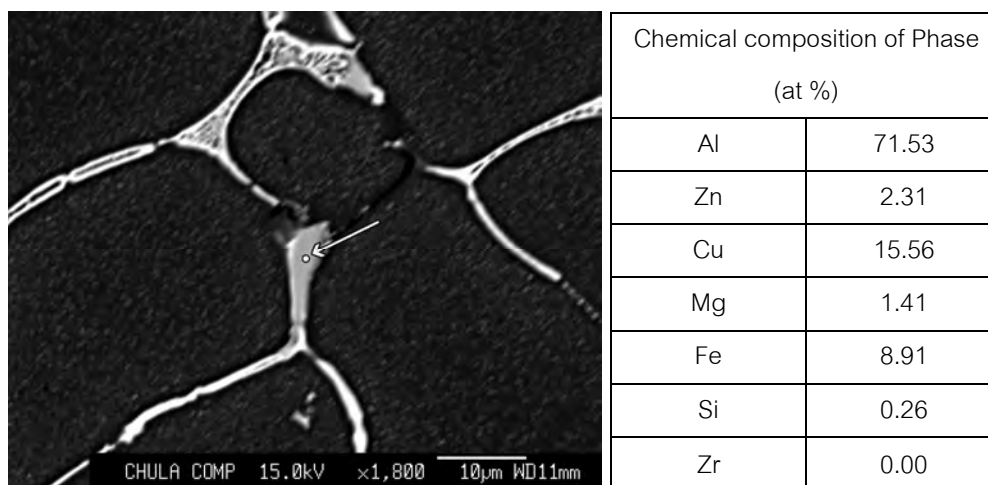
	Chemical composition of Phase (at %)				
	A	B	C	D	E
Al	37.72	56.91	73.54	54.04	28.87
Zn	26.69	17.66	1.65	1.77	28.76
Cu	9.85	7.41	15.61	15.79	11.82
Mg	25.62	17.97	1.22	12.05	30.48
Fe	0.03	0.00	7.79	3.06	0.01
Si	0.08	0.05	0.19	13.21	0.03
Zr	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01

ภาพที่ 4.9 Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis โครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu



ภาพที่ 4.10 X-Ray Maps โครงสร้างยูเทคติกที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu

จากภาพที่ 4.9 สามารถเห็นได้ว่าโครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเฟสสีขาวที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar เป็นเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) สลับกับกับเฟสปฐมภูมิของ  $\alpha$  (Al) และเมื่อตรวจสอบเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ด้วยวิธี Spot Analysis ดังภาพที่ 4.9 (จุด A และ B) พบว่าอัตราส่วนโดยอะตอมโดยประมาณของ Mg : (Zn + Cu) เท่ากับ 1 : 1.4 จากผลดังกล่าวพบว่าเฟสดังกล่าวมีทองแดงละลายอยู่ดังที่กล่าวข้างต้น และนอกจากนั้นสามารถสังเกตเห็นว่าเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ยังมีลักษณะคล้ายทรงกลมแยกตัวออกจากโครงสร้างยูเทคติกดังภาพที่ 4.9 (b) จุด E ซึ่งพบว่าอัตราส่วนโดยอะตอมของ Mg : (Zn + Cu) เท่ากับ 1 : 1.4 เช่นเดียวกับเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar



ภาพที่ 4.11 Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis

เฟส  $Al_7Cu_2Fe$  ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu

นอกจากนี้ยังพบเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  ดังภาพที่ 4.9 (a) จุด C โดยผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Spot Analysis ได้แสดงถึงปริมาณของเหล็ก (Fe) ในเฟสดังกล่าวที่มีปริมาณความเข้มข้นมาก และ X-ray maps แสดงการกระจายตัวของเหล็กและทองแดงที่มีความหนาแน่นมากในบริเวณดังกล่าว โดยเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  เป็นเฟสสี่เหลี่ยมมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมยาว (จากงานวิจัยที่ผ่านมาเรียกลักษณะของเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  นี้ว่า "Facet shape") โดยวางตัวอยู่บนโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar นอกจากนี้ยังพบลักษณะของเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  เฟสสี่เหลี่ยมที่วางอยู่บนเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ที่เฟสมีลักษณะเป็นเส้นขอบต่อเนื่องดังภาพที่ 4.11 และจาก X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกที่กำลังขยายสูงแสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่ามีตำแหน่งที่มีธาตุซิลิกอน

ที่มีความเข้มข้นสูง และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Spot Analysis พบว่ามีปริมาณของซิลิกอนสูงถึง 13.21 at % ซึ่งสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ แสดงว่าตำแหน่งดังกล่าวเป็นเฟส  $Mg_2Si$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีลักษณะเป็นสีดำภายในโครงสร้าง

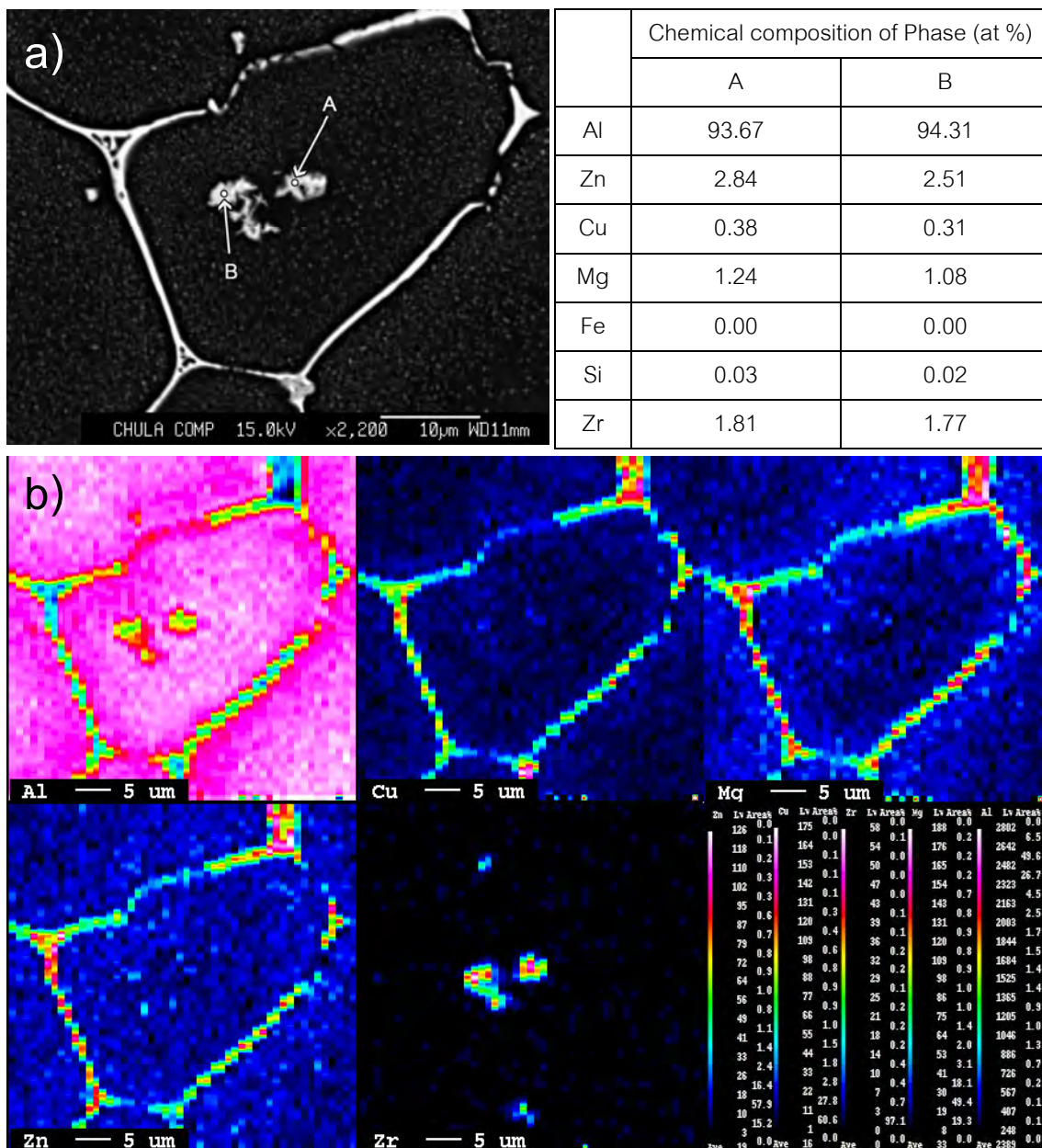
เฟส  $Al_3Zr$  สามารถพบในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมเช่นเดียวกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปร่างคล้ายดาวกระจายแยกตัวออกมาจากโครงสร้างยูเทคติกที่เชื่อมตัวต่อกันแสดงดังภาพที่ 4.12 จุด A และ B โดยผลวิเคราะห์ด้วยวิธี Spot Analysis พบว่าเฟสดังกล่าวมีปริมาณประมาณ 1.8 at % ซึ่งสอดคล้องกับ X-Ray Maps ว่าบริเวณที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายดาวกระจายมีปริมาณของอะลูมิเนียมและเซอร์โคเนียมหนาแน่นมากเมื่อเทียบกับการกระจายตัวของธาตุอื่น ๆ ในบริเวณดังกล่าว

จากภาพที่ 4.13 (a) สามารถสังเกตลักษณะของเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) จากวงกลมสีแดง (ตำแหน่ง A และ B) ซึ่งเป็นเฟสสีเทาเข้มกระจายตัวอยู่ตามโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar โดยแทรกตัวอยู่ในโครงร่างตาข่ายที่มีเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อพิจารณา X-Ray Maps ภาพที่ 4.13 (b) พบว่าบริเวณของเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) จะมีความหนาแน่นของสังกะสีน้อยกว่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ ของโครงสร้างยูเทคติก แต่มีปริมาณของทองแดงที่หนาแน่นมากกว่าตำแหน่งอื่น และจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Spot Analysis พบว่าอัตราส่วนโดยอะตอมของ Mg : (Cu + Zn) เท่ากับ 1 : 0.9 – 1.1 และจาก X-Ray Maps ภาพที่ 4.13 (b) พบว่ามีเฟส  $Mg_2Si$  ปรากฏอยู่ในบริเวณที่มีปริมาณของซิลิกอนหนาแน่นมาก

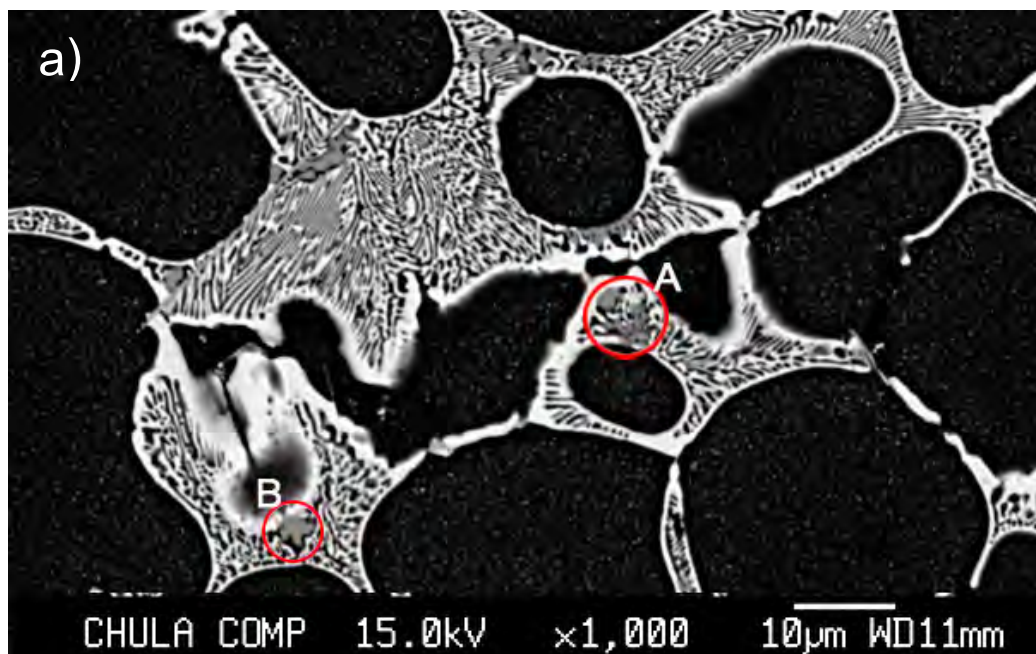
ในการพิจารณาเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) ซึ่งจาก X-ray diffraction patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อ สามารถพบพีคของเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) เป็นพีคเดียวในโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu$  ซึ่งมีอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อสังกะสี (Mg : Zn) สูงสุดในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการศึกษา แต่สำหรับชิ้นงานอื่นมีความเป็นไปได้ที่จะมีเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) แต่อาจมีปริมาณน้อย โดยเมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยเทคนิคการฉายภาพแบบ Backscattered electron image (BSE) แสดงดังภาพที่ 4.14 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีบริเวณโครงสร้าง Lamellar โดยที่บริเวณที่สีสว่างกว่าเป็นเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) (ภาพที่ 4.14 ตำแหน่ง A) และบริเวณที่สีเข้มกว่าเป็นเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) (ภาพที่ 4.14 ตำแหน่ง B) โดยใช้หลักการการแยกชนิดของเฟสตามเลขอะตอมของเฟสดังที่กล่าวมาข้างต้น และเมื่อนำไปตรวจสอบด้วยวิธี Mapping พบว่าบริเวณเฟสสีสว่างและสีเข้มดังกล่าว มีความหนาแน่นของการกระจายของธาตุ



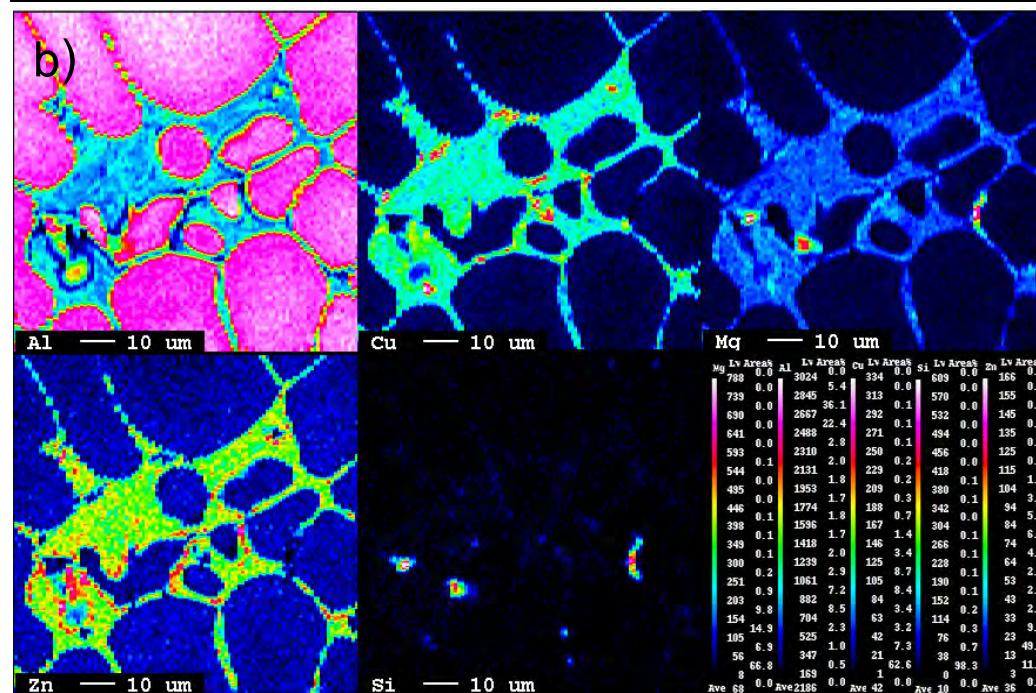
สังกะสี, แมกนีเซียม และทองแดงอยู่ร่วมกันดังภาพที่ 4.15 ซึ่งการเกิดเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) แทนที่เฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เพราะสัดส่วนของปริมาณแมกนีเซียมต่อสังกะสีสูงที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม [1]



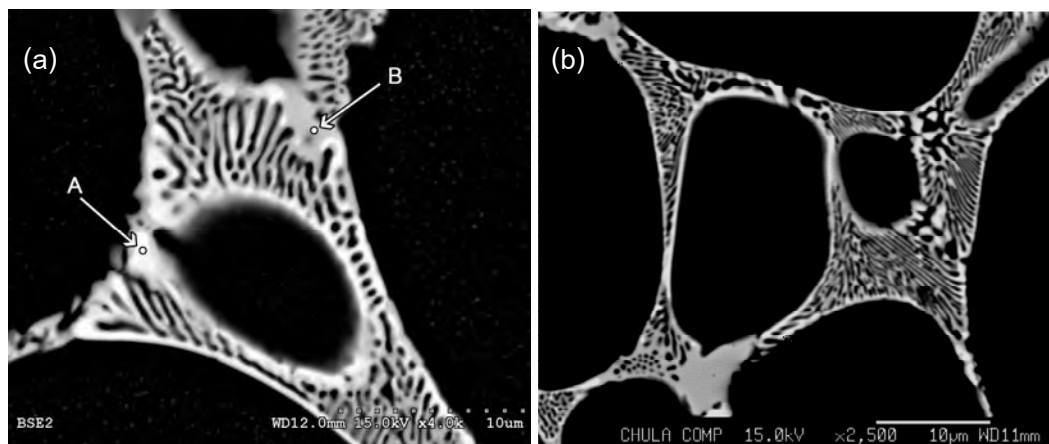
ภาพที่ 4.12 (a) Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis ของเฟส  $Al_3Zr$  และ (b) X-Ray Maps ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu



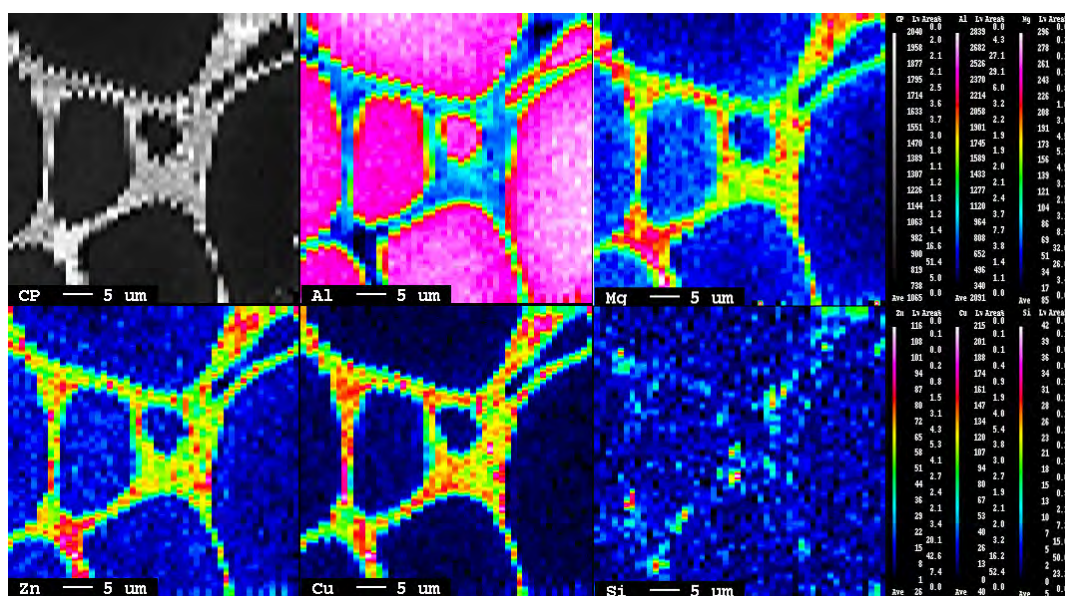
	Chemical composition of Phase (at %)						
	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr
A	61.05	3.21	18.63	17.00	0.00	0.11	0.01
B	54.84	1.85	22.79	19.89	0.00	0.63	0.00



ภาพที่ 4.13 (a) Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์ Spot Analysis ของเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) และ (b) X-Ray Maps ของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu}$



ภาพที่ 4.14 (a) โครงสร้าง Lamellar ที่ประกอบด้วยเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) และ T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu$   
 (b) โครงสร้างยูเทคติกที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยวิธี Mapping



ภาพที่ 4.15 X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu$

ซึ่งจากการศึกษาลักษณะของเฟสภายในโครงสร้างพบว่าโครงยูเทคติกส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar โดยส่วนใหญ่เป็นเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) สลับกับเฟส  $\alpha$  (Al) นอกจากนี้ยังพบเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) กระจายอยู่ตามโครงสร้าง Lamellar เฟส  $Al_7Cu_2Fe$  ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแท่งยาววางตัวบนโครงสร้าง Lamellar และเฟส  $Al_3Zr$  มีลักษณะเป็นดาวกระจายกระจายตัวอยู่ภายในขอบเกรน สำหรับเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) สามารถสังเกตลักษณะของเฟสได้

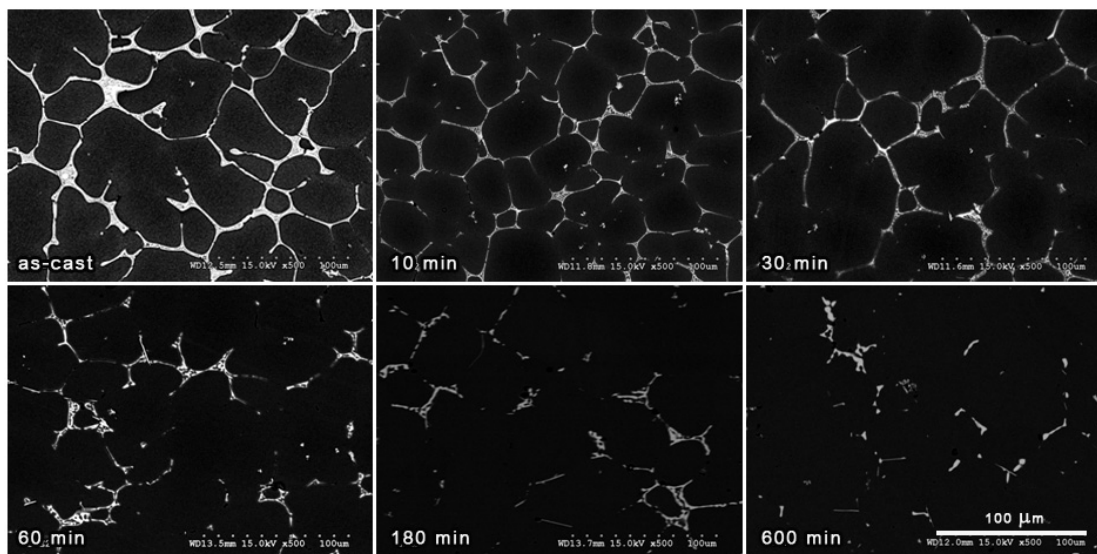
เด่นชัดในโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu โดยเป็นส่วนประกอบของโครงสร้าง Lamellar ร่วมกับเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) และ เฟส  $\alpha$  (Al)

#### 4.2 โครงสร้างของโลหะอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว

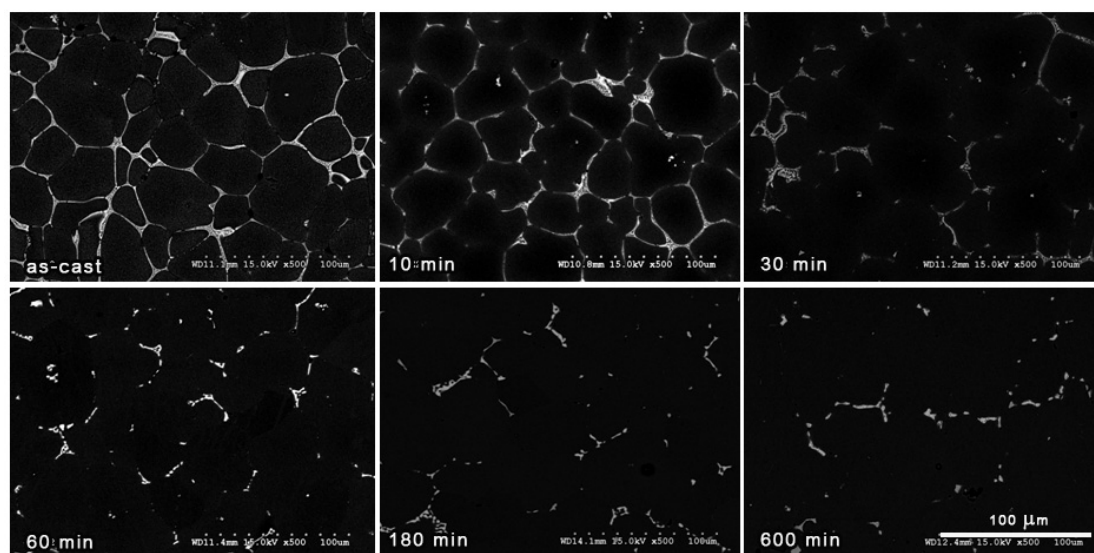
ในการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวใช้เครื่องมือและเทคนิคคล้ายกับการศึกษาโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อ ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) แบบวิธี Backscatter Electron Image, เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) และกล้องจุลทรรศน์ชนิดวิเคราะห์แนวการสะท้อนและเลี้ยวเบนของรังสีอิเล็กตรอน (Electron Probe Microscope Analysis, EPMA)

##### 4.2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว

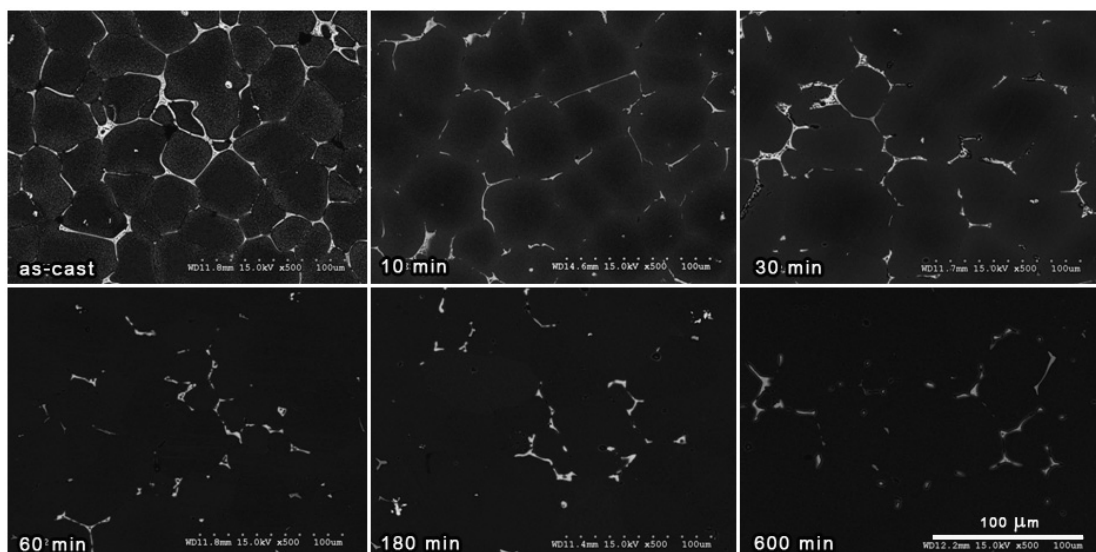
กระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ทำการอบที่อุณหภูมิ 460 °C เป็นเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที ซึ่งโครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาของการอบให้เป็นเนื้อเดียวดังภาพที่ 4.16 – 4.22 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคภายหลังกระบวนการการหล่อและกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลาแตกต่างกันของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยโครงสร้างยูเทคติกละลายเข้าสู่เนื้อพื้นอะลูมิเนียมตามระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว โดยโครงสร้างยูเทคติกที่ยังคงอยู่ในโครงสร้างไม่เชื่อมโยงต่อกัน เมื่อผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที สามารถสังเกตว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu, Al-10.0Zn-2.5Mg-1.5Cu, Al-10.0Zn-2.5Mg-1.0Cu, Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu และ Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu ยังมีโครงสร้างยูเทคติกคงอยู่ภายในโครงสร้าง แต่ปริมาณลดลงอย่างเห็นเด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อ สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.5Mg-2.3Cu และ Al-10.0Zn-1.0Mg-2.3Cu โครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมคล้ายกับเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  ของโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อ สำหรับการวิเคราะห์เฟสภายในโครงสร้างหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



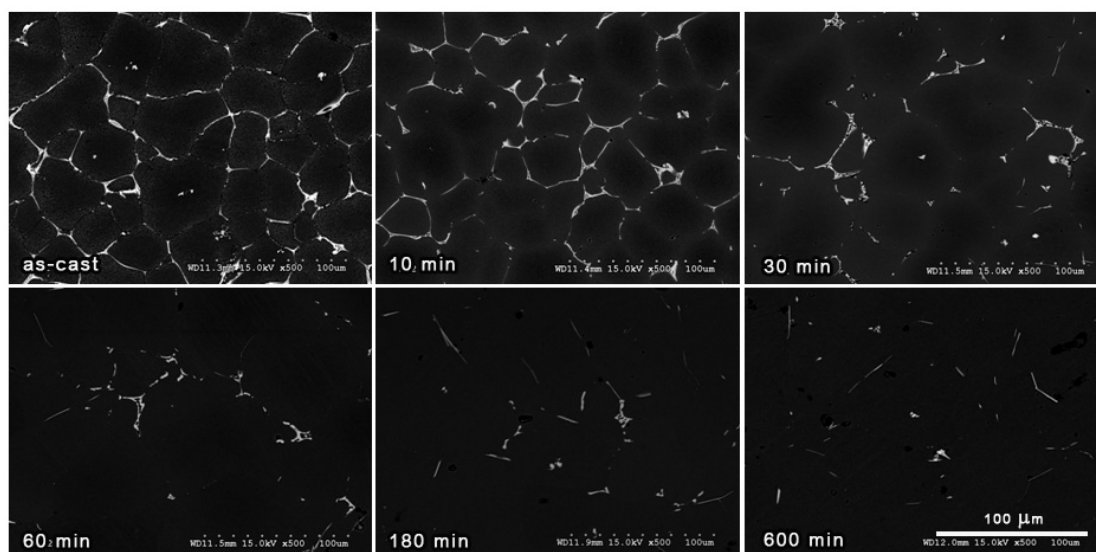
ภาพที่ 4.16 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อ และภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที



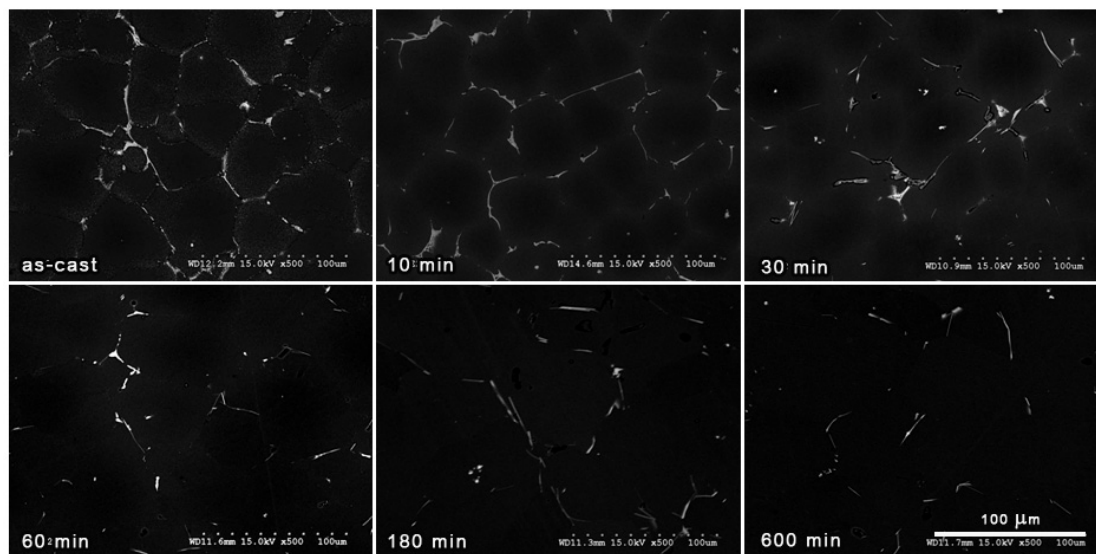
ภาพที่ 4.17 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อ และภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.5Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที



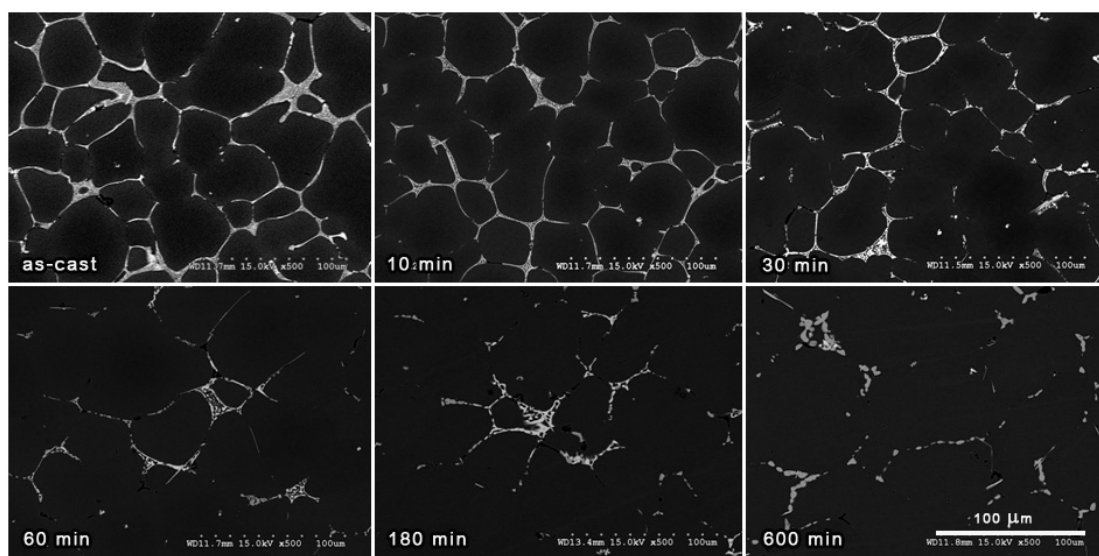
ภาพที่ 4.18 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อ และภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.0Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที



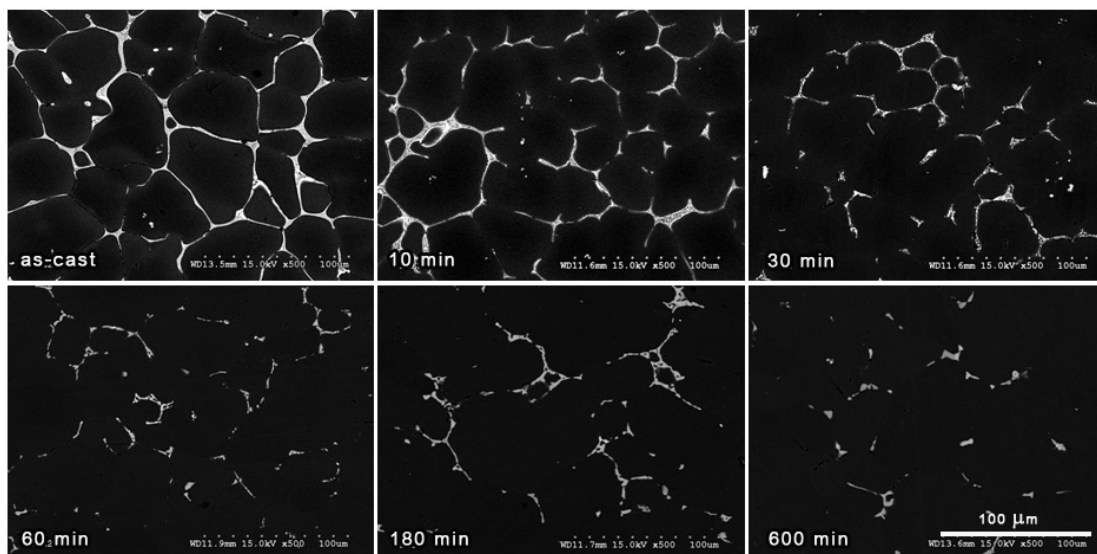
ภาพที่ 4.19 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อ และภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.5Mg-2.3Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที



ภาพที่ 4.20 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-10.0Zn-1.0Mg-2.3Cu}$  เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที



ภาพที่ 4.21 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu}$  เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที



ภาพที่ 4.22 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อ และภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu เป็นระยะเวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที

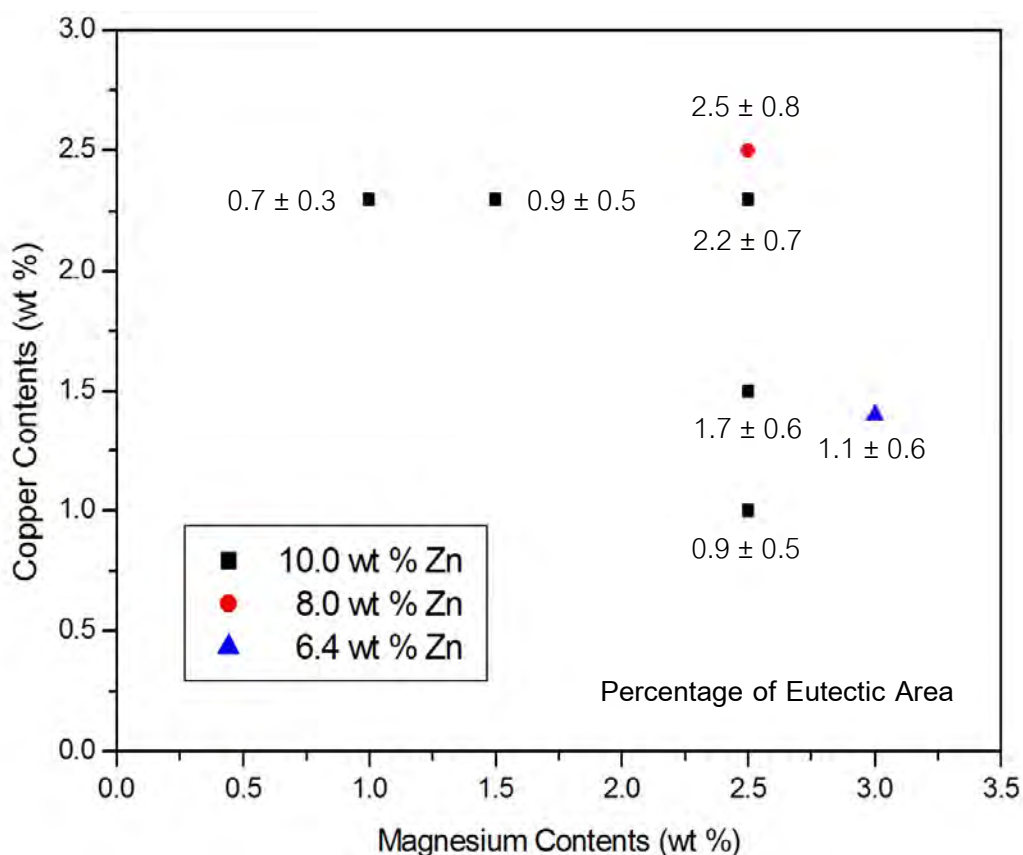
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที ที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

ชั้นที่	ส่วนประกอบทางเคมี (wt %)				ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติก (Percentage of Eutectic area)
	Zn	Mg	Cu	Al	
1	10.0	2.5	2.3	Bal.	$2.2 \pm 0.7$
2	10.0	2.5	1.5	Bal.	$1.7 \pm 0.6$
3	10.0	2.5	1.0	Bal.	$0.9 \pm 0.5$
4	10.0	1.5	2.3	Bal.	$0.9 \pm 0.5$
5	10.0	1.0	2.3	Bal.	$0.7 \pm 0.3$
6	8.0	2.5	2.5	Bal.	$2.5 \pm 0.8$
7	6.4	3.0	1.4	Bal.	$1.1 \pm 0.6$

ในการวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างภายหลังจากกระบวนการหล่อ จะวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาทีเท่านั้น โดยผลการวัดปริมาณโครงสร้างยูเทคติกแสดงดังตารางที่ 4.4 และการเปรียบเทียบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกกับส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสม



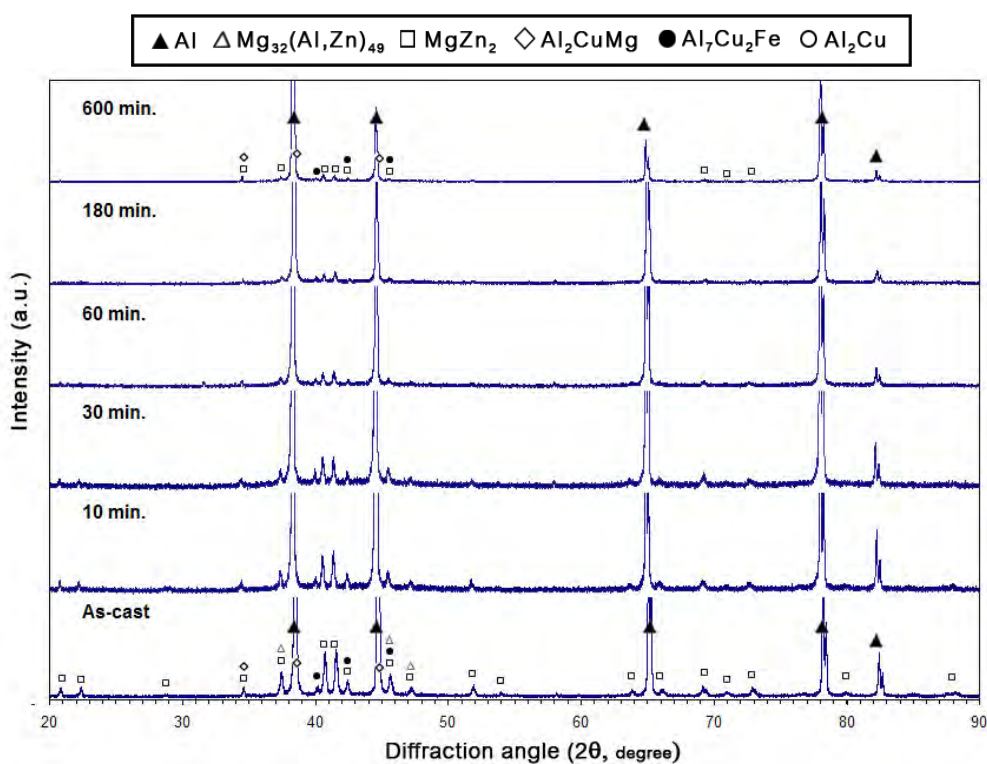
อะลูมิเนียมแสดงดังภาพที่ 4.23 สำหรับช่วงของปริมาณยูเทคติกที่ได้จากการวัดคำนวณจากสมการทางสถิติเรื่องช่วงความมั่นใจของข้อมูลที่กล่าวในภาคผนวก ข โดยปริมาณโครงสร้างยูเทคติกที่ยังเหลืออยู่ภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที มีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใกล้เคียงกับสภาพหลังกระบวนการหล่อ เมื่อปริมาณของธาตุผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมลดลง (สังกะสี, แมกนีเซียม และทองแดง) ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกมีแนวโน้มลดลงด้วย แต่สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.5Cu มีปริมาณโครงสร้างยูเทคติกมากกว่า Al-10.0Zn-2.5Mg-2.5Cu อาจเป็นเพราะความผิดพลาดของการวัด เพราะโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที มีปริมาณที่น้อยและมีรูปร่างไม่เชื่อมโยงกันต่อกัน จึงยากต่อการวัดปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกได้



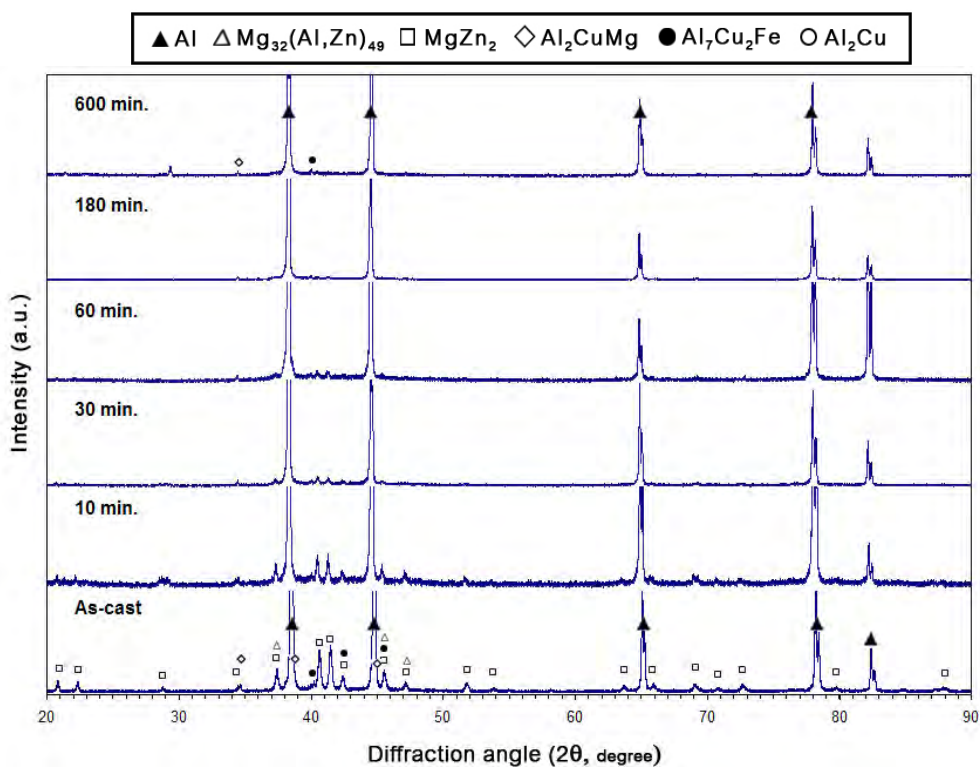
ภาพที่ 4.23 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที ที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน

#### 4.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบภายในโครงสร้างภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว

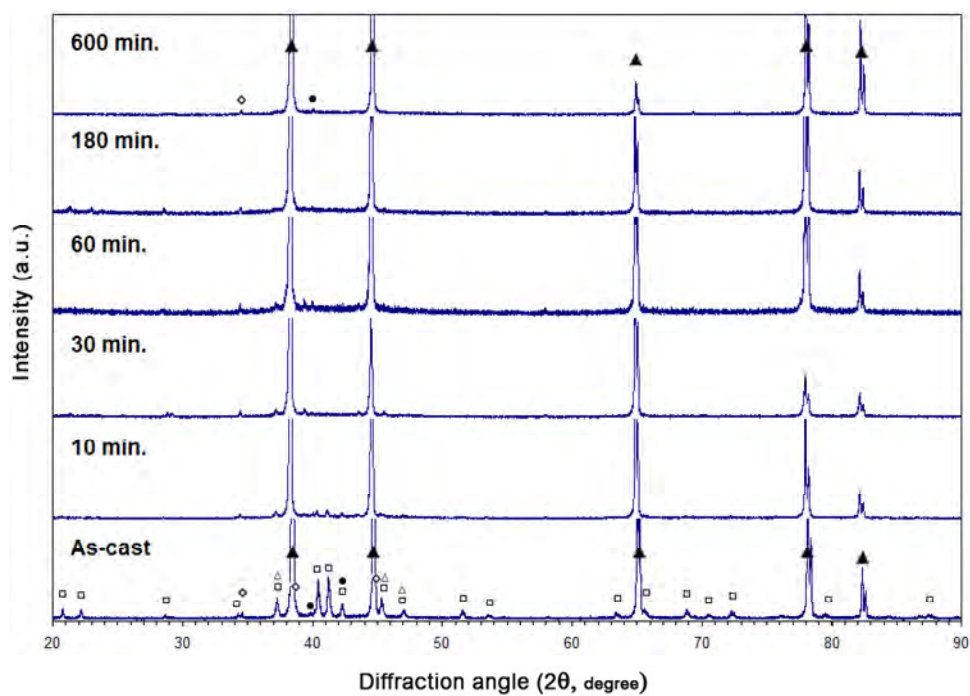
ภาพที่ 4.24 – 4.30 แสดง Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเพิ่มขึ้นความสูงพีกของเฟสทุติยภูมิ (Secondary phase) ลดลง



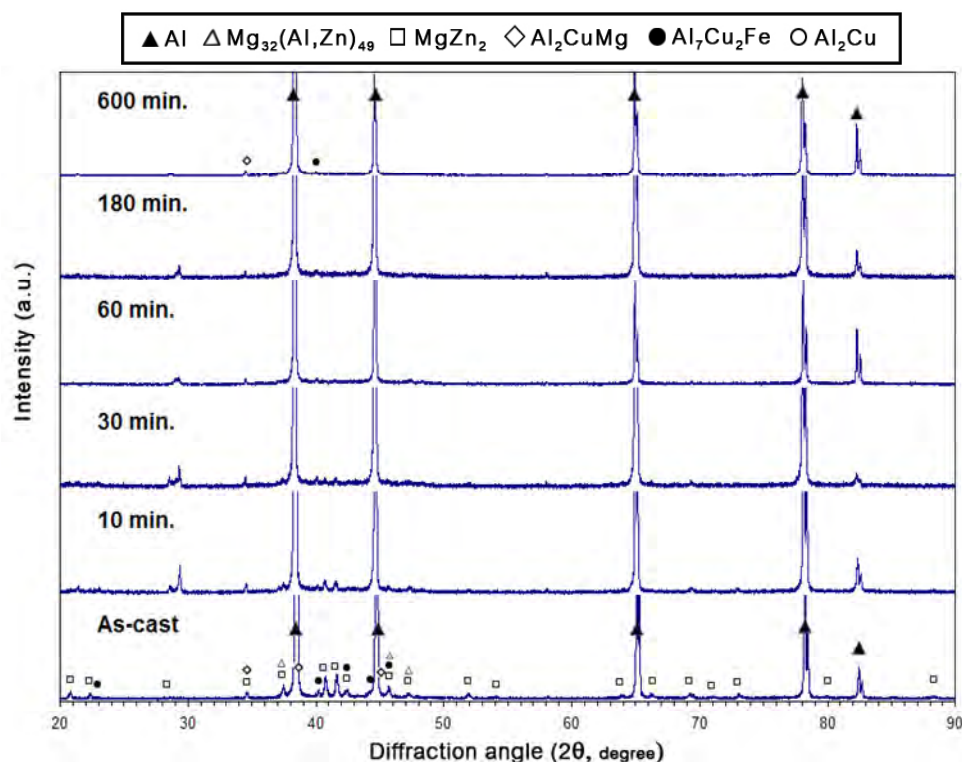
ภาพที่ 4.24 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว



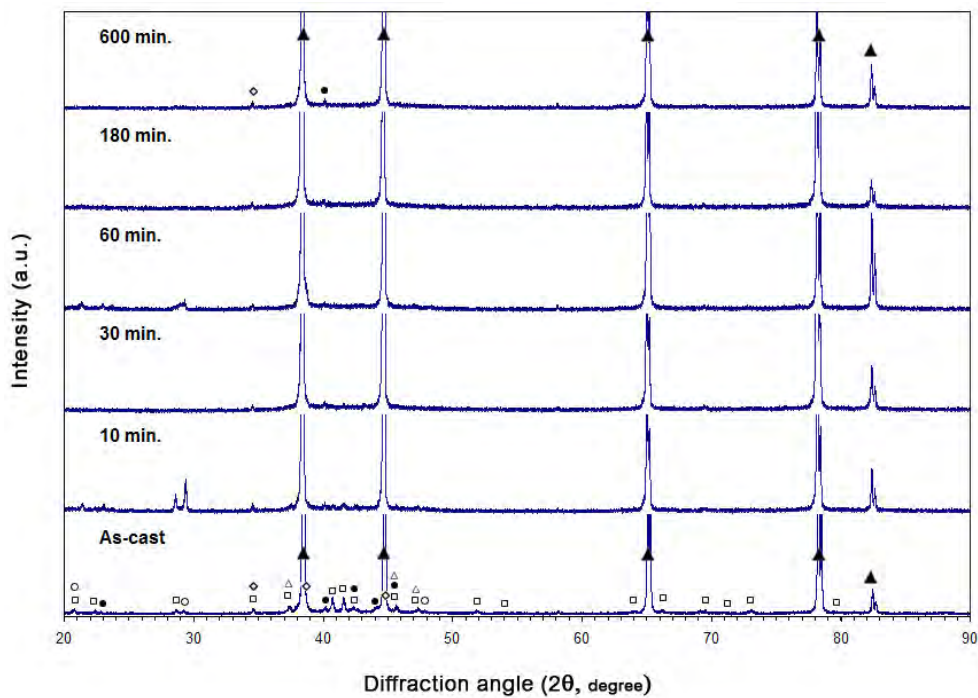
ภาพที่ 4.25 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.5Cu  
 ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว



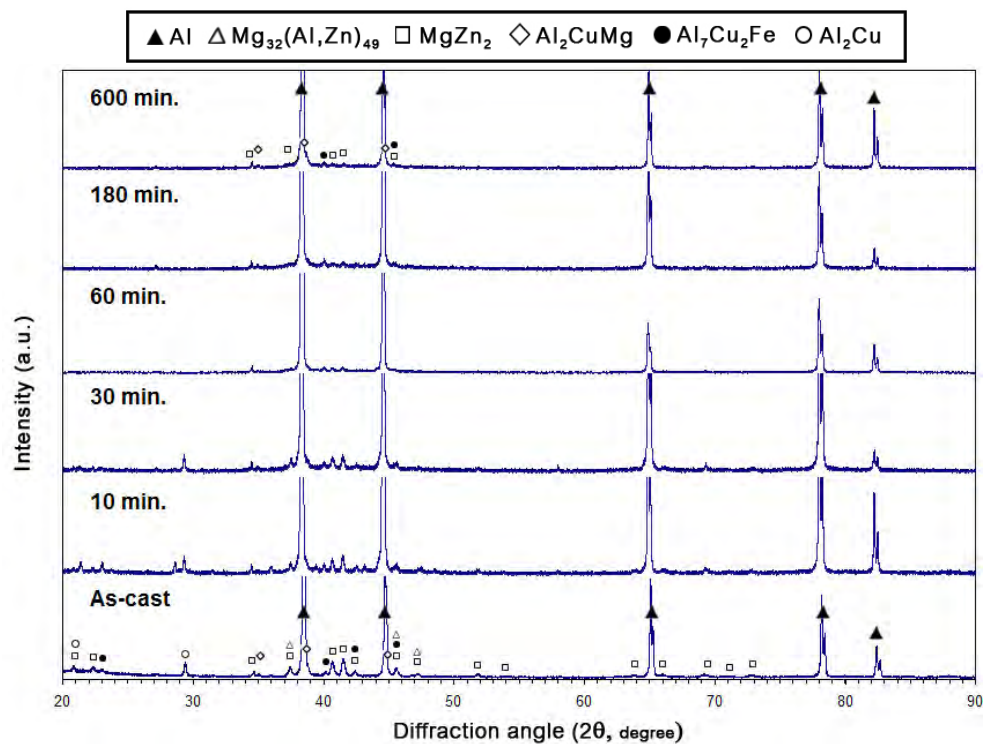
ภาพที่ 4.26 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-1.0Cu  
 ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว



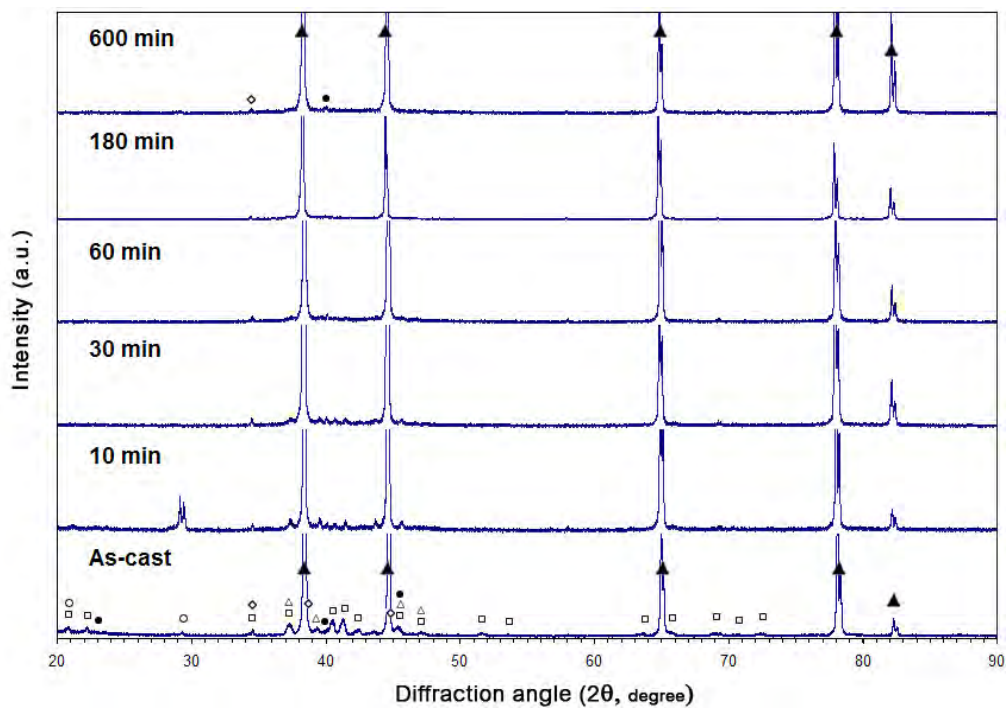
ภาพที่ 4.27 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.5Mg-2.3Cu  
 ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว



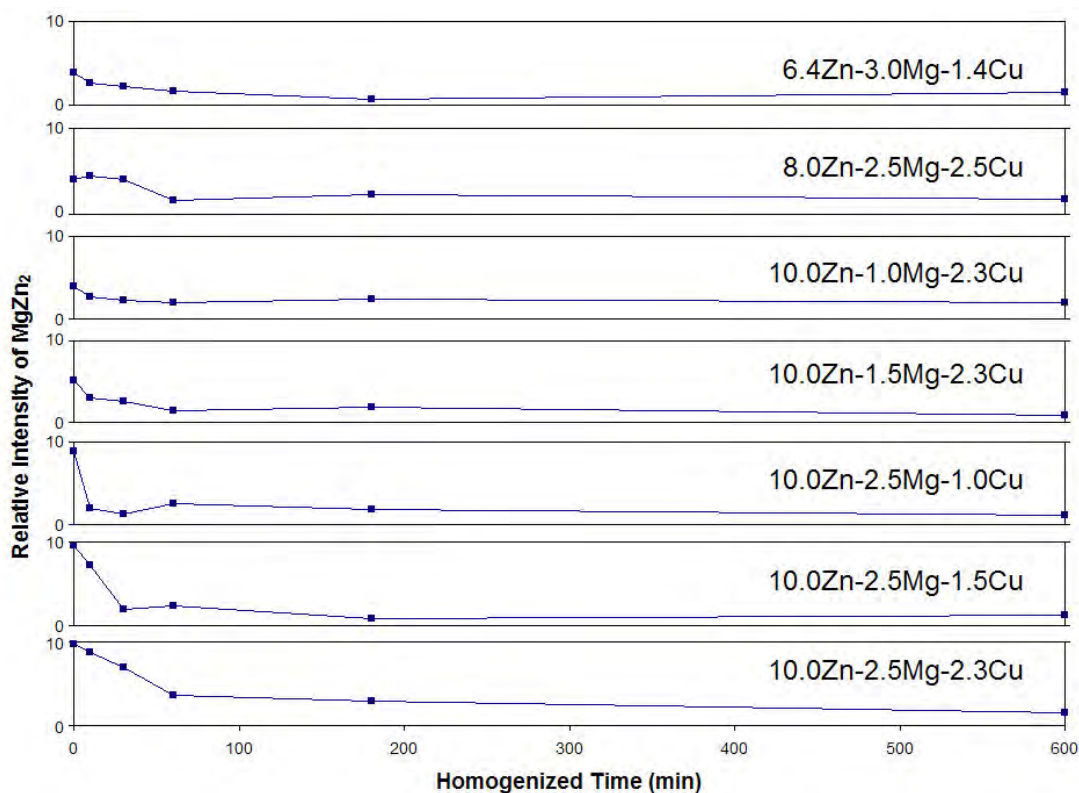
ภาพที่ 4.28 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-1.0Mg-2.3Cu  
 ภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว



ภาพที่ 4.29 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว

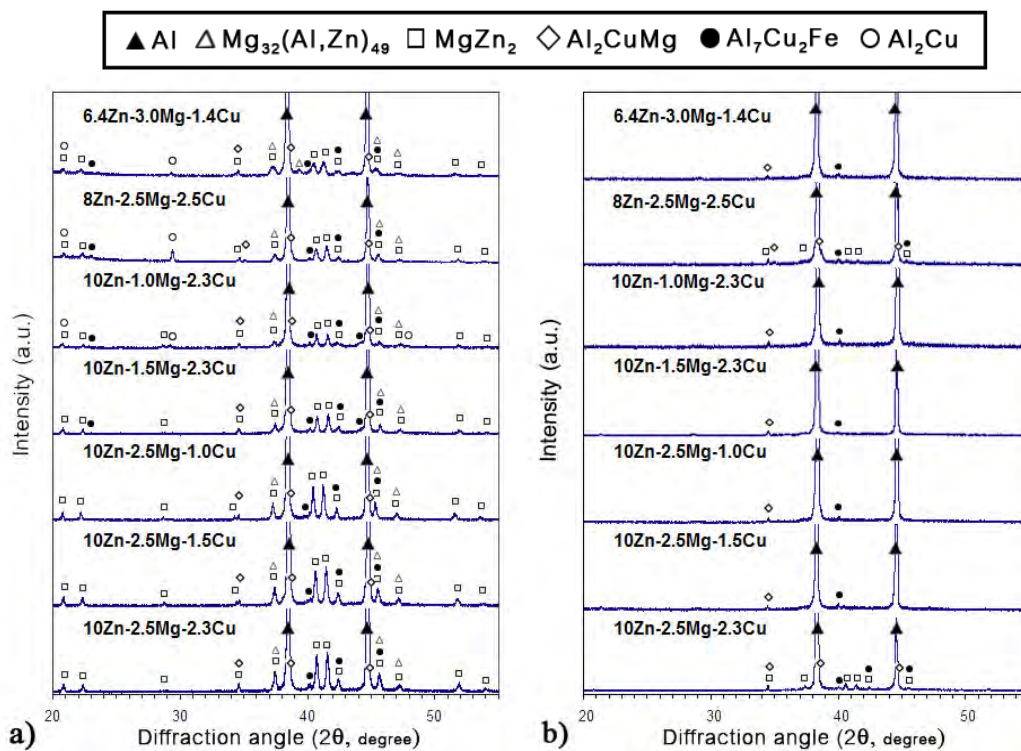


ภาพที่ 4.30 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu ภายหลังจากกระบวนการหล่อและภายหลังจากกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว



ภาพที่ 4.31 การเปรียบเทียบปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ซึ่งคุณภาพของโลหะผสมอะลูมิเนียมเมื่อระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์เฟสในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เป็นเฟสหลักภายในโครงสร้างยูเทคติก และจาก Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว ซึ่งพีคของเฟสอื่น ๆ ที่ปรากฏใน X-ray diffraction patterns มีความสูงพีคที่ต่ำ และตำแหน่งของพีคมีการซ้อนทับ จึงยากต่อการนำข้อมูลจาก X-ray diffraction patterns มาเปรียบเทียบปริมาณของเฟสที่เปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ดังนั้นจึงนำ Relative Intensity ของพีคของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) คำนวณจากสมการที่ 4.1 โดยพีคดังกล่าวมีความสูงพีค และ Diffraction patterns ที่ชัดเจน โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ซึ่งคุณภาพของโลหะผสมอะลูมิเนียมเมื่อผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่ระยะเวลาการอบต่าง ๆ ดังภาพที่ 4.31 โดยปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ซึ่งทุก ๆ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวปริมาณของเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) มีแนวโน้มที่ลดลงตามระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว ซึ่งสามารถตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมว่าเฟสดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามผลการเปรียบเทียบดังที่กล่าวมาแล้ว

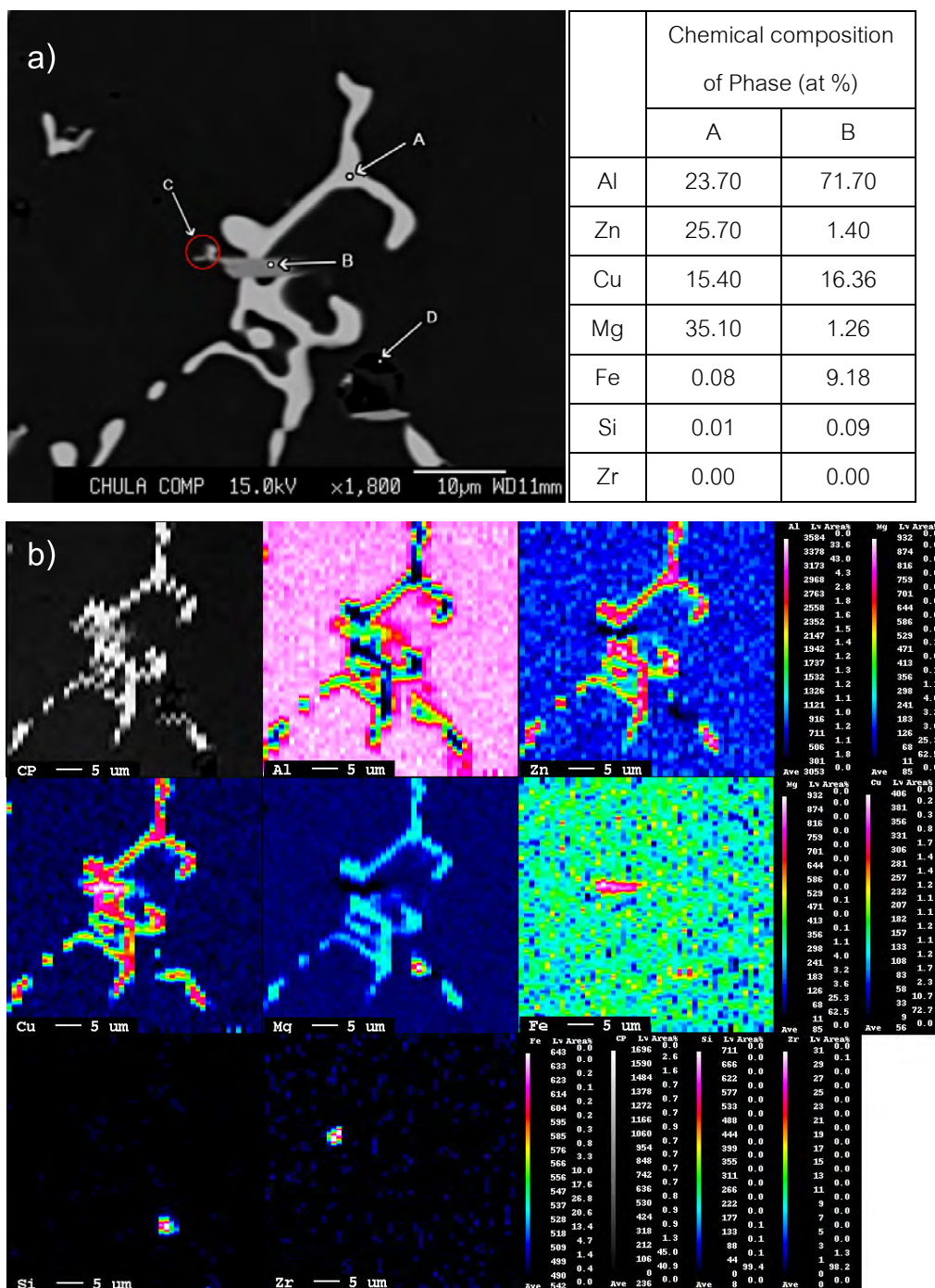


ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบ X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม  
 a) ภายหลังกระบวนการหล่อ b) ภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที

จากการเปรียบเทียบ Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อและภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที ดังภาพที่ 4.32 ซึ่งเห็นได้ว่า Diffraction Patterns โลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที ของ Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu และ Al-8.0Zn-2.5Mg-2.5Cu พบพีคของเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เหลือไม่พบเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) ซึ่งอาจมีปริมาณน้อยมากทำให้ไม่สามารถตรวจพบเจอได้ แต่สำหรับเฟส  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  และ  $\text{S}$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) พบใน Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาทีทุกชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์เฟสภายในโครงสร้างด้วยเครื่อง Electron Probe Microscope Analysis (EPMA) พบว่าภายในโครงสร้างภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่ใช้ระยะเวลาในการอบ 600 นาที มีเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) โดยมีปริมาณที่น้อยกว่าสถานะภายหลังกระบวนการหล่อ โดยจากผลการวิเคราะห์แบบ Spot analysis (ดังภาพที่ 4.33 a) ตำแหน่ง A) ซึ่งมีอัตราส่วนของ  $\text{Mg} : (\text{Zn} + \text{Cu})$  เท่ากับ 1 : 1.17 ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราส่วนของเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) ในโครงสร้างภายหลังกระบวนการหล่อ นอกจากนี้สามารถพบเฟส  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  แสดงดังภาพที่ 4.33 a) ตำแหน่ง

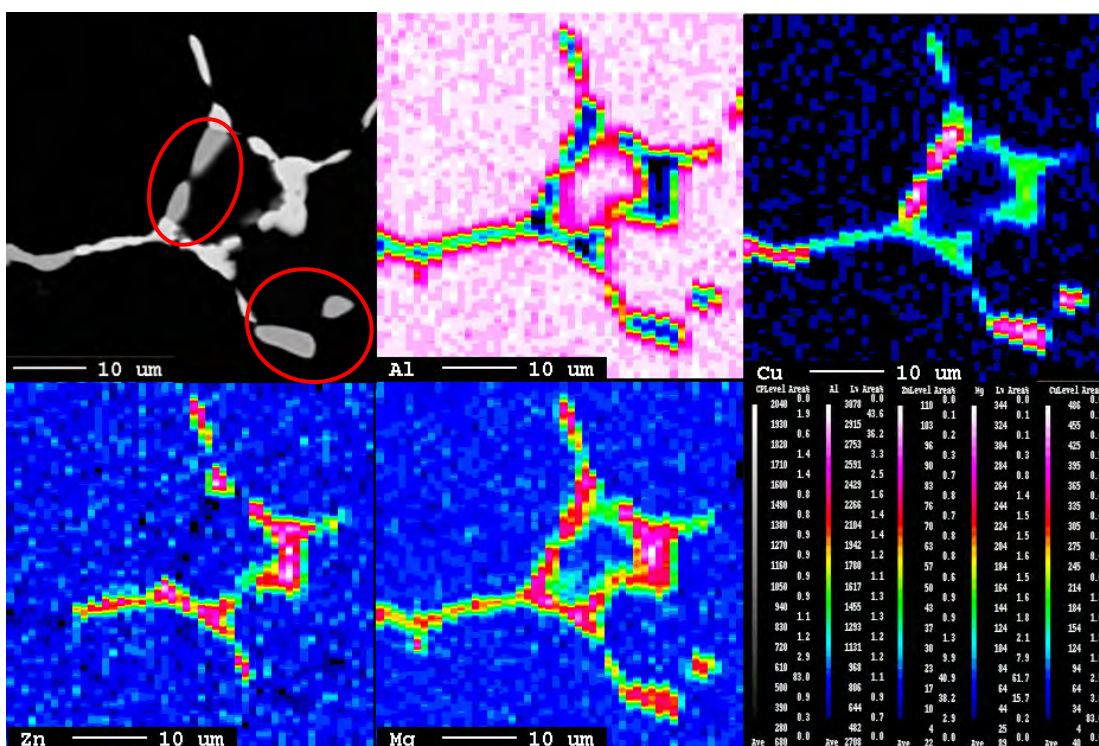
B ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว โดยจาก X-ray maps แสดงดังภาพที่ 4.33 b) ทำให้ทราบว่าบริเวณดังกล่าวมีปริมาณของธาตุ Fe ที่มีความหนาแน่นมาก นอกจากนี้ยังพบเฟส  $\text{Al}_3\text{Zr}$  และ  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ดังภาพที่ 4.34 a) ตำแหน่ง C และ D ตามลำดับ



ภาพที่ 4.33 a) Backscatter Electron Image และผลการวิเคราะห์เฟสด้วยวิธี Spot Analysis  
 b) X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu}$   
 ภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที



สำหรับเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) ที่พบใน X-ray diffraction patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายใต้กระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที ซึ่งในการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu}$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Backscattered Electron Image (BSE) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Mapping analysis ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ดังภาพที่ 4.34 สามารถเห็นเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) (ภาพที่ 4.34 แสดงด้วยวงกลมสีแดง) อย่างชัดเจนโดยมีลักษณะเป็นสีเทาและมีความหนาแน่นของธาตุสังกะสีต่ำ ซึ่งอยู่ใกล้กับเฟสสีขาวซึ่งเป็นเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ )



ภาพที่ 4.34 X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu}$  ภายใต้กระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusion Coefficient;  $\text{m}^2/\text{s}$ ) ของธาตุต่าง ๆ ในเนื้อพื้นของโลหะอะลูมิเนียม (สถานะของแข็ง) ที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยสมการที่ 4.2 [17]

$$D_s = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (\text{สมการที่ 4.2})$$

เมื่อ  $D_s$  คือ Self-diffusion coefficient ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

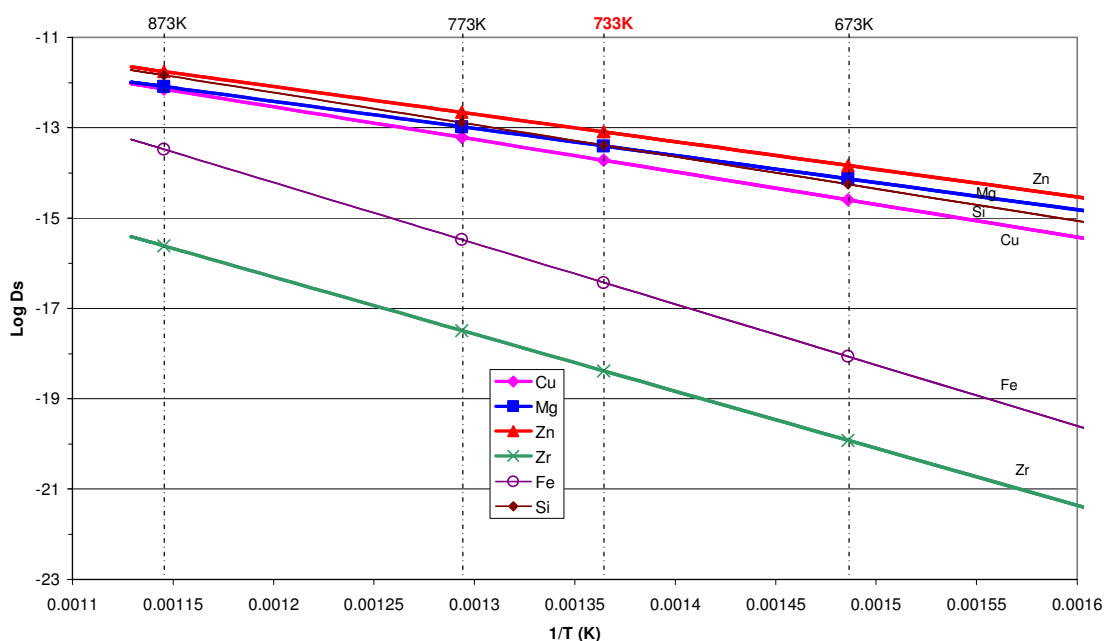
$D_0$  คือ Frequency factor ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Q คือ Activation energy (J)

R คือ ค่าคงที่ 8.314 J/K

T คือ อุณหภูมิ (K)

สมการที่ 4.2 สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุต่าง ๆ กับอุณหภูมิต่าง ๆ ดังภาพที่ 4.35 [18]

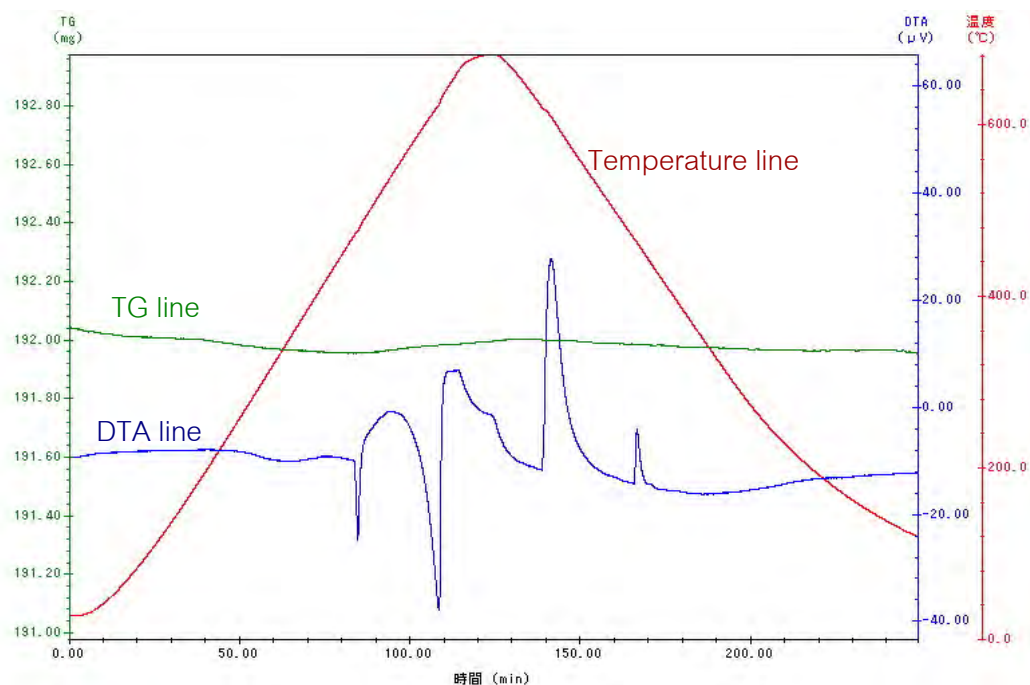


ภาพที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุต่าง ๆ ในอะลูมิเนียมกับอุณหภูมิในช่วงของการแพร่ [18]

พิจารณาที่อุณหภูมิ 733 K (460 °C) เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบให้เนื้อเดียว ซึ่งจะเห็นว่า Zn, Mg, Si, Cu, Fe และ Zr มีค่า  $D_s$  มากไปน้อยตามลำดับ โดยค่า  $D_s$  ที่มากหมายถึงธาตุนั้น ๆ สามารถแพร่เข้าสู่โลหะอะลูมิเนียมได้เร็ว ซึ่งเฟส  $Al_7CuFe$  ที่ยังคงพบอยู่ในโครงสร้างหลังกระบวนการอบให้เนื้อเดียว และมีปริมาณที่ลดลงน้อยกว่าการลดลงของปริมาณเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เพราะ Fe มีค่า  $D_s$  ต่ำกว่าธาตุนั้น ๆ ยกเว้น Zr แสดงว่า Fe เกิดการแพร่ในโลหะอะลูมิเนียมช้ากว่าธาตุนั้น ซึ่งเป็นเหตุผลว่าเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) เกิดการแพร่ในโลหะอะลูมิเนียมได้เร็วกว่าจึงละลายเข้าสู่เนื้อพื้นได้เร็วกว่าเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  และนอกจากนี้โครงสร้างภายหลังกระบวนการอบให้เนื้อเดียวพบเฟส  $Al_3Zr$  ซึ่ง Zr มีค่า  $D_s$  ต่ำสุดเมื่อเปรียบกับธาตุนั้น ๆ ที่ใช้ในการพิจารณา

### 4.3 การวิเคราะห์ลำดับการเกิดเฟส

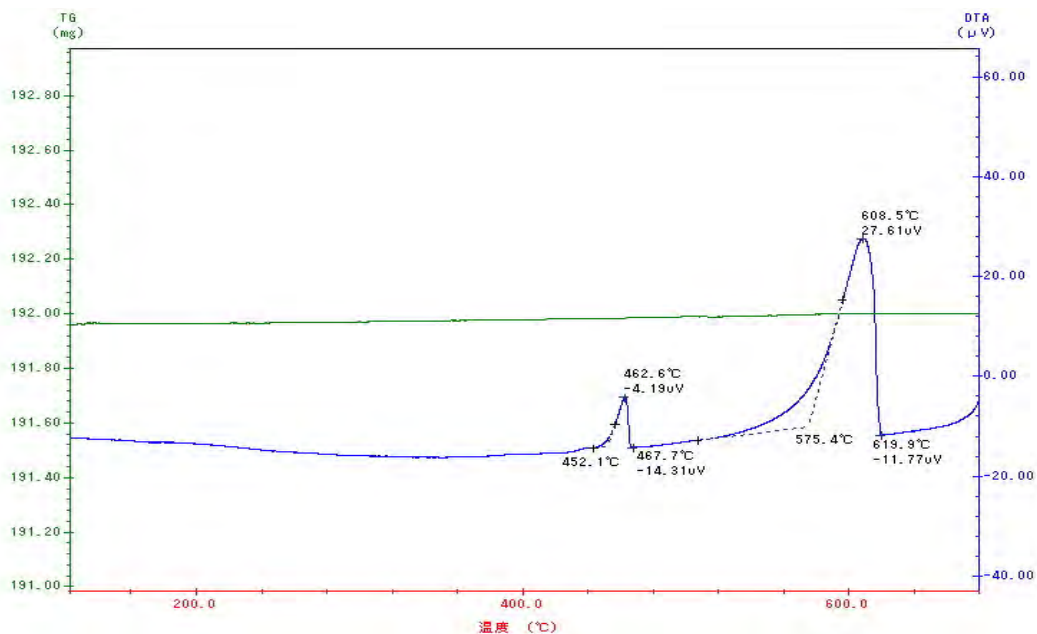
การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพื่อตรวจสอบว่ามีเฟสที่วิเคราะห์เกิดขึ้นจริงภายในโครงสร้าง โดยทำการศึกษาลำดับการเกิดเฟสของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ในขั้นตอนแรกนำชิ้นงานไปตรวจสอบอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาภายในโครงสร้างด้วยเครื่อง Differential Thermal Analyzer (DTA) ซึ่งผลการวิเคราะห์อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาภายในโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 4.36 แต่การวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาจะพิจารณาเฉพาะช่วงของการแข็งตัว (Solidification profile) ดังภาพที่ 4.37



ภาพที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ด้วยเครื่องมือ DTA

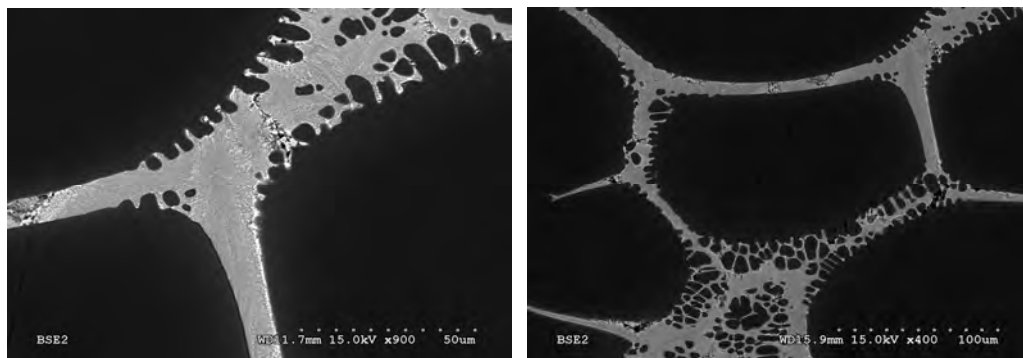
จากภาพที่ 4.37 พบว่ามีช่วงของการเกิดปฏิกิริยาภายในโครงสร้างที่สามารถสังเกตได้คือ อุณหภูมิประมาณ 600 °C และ 462 °C โดยที่อุณหภูมิประมาณ 600 °C เป็นอุณหภูมิของเส้น Solidus (เป็นเส้นที่บอกว่าที่ตำแหน่งต่ำกว่าเส้นนี้ระบบจะมีสภาพเป็นของแข็งทั้งหมด) โดยเมื่อหลังจากอุณหภูมินี้จะเริ่มเกิดการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม และอุณหภูมิประมาณ 462 °C เป็นอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยายูเทคติก เพื่อยืนยันและตรวจสอบช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจึงทำ Interrupted Solidification โดยการนำชิ้นงานไปอบโดยแช่ไว้ที่อุณหภูมิ 630 °C เป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว แล้วเย็นตัวถึงอุณหภูมิที่สนใจ

เพื่อศึกษาการเกิดเฟสในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลา 60 นาที โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาการเกิดเฟสคือ 400, 450, 515 และ 590 °C



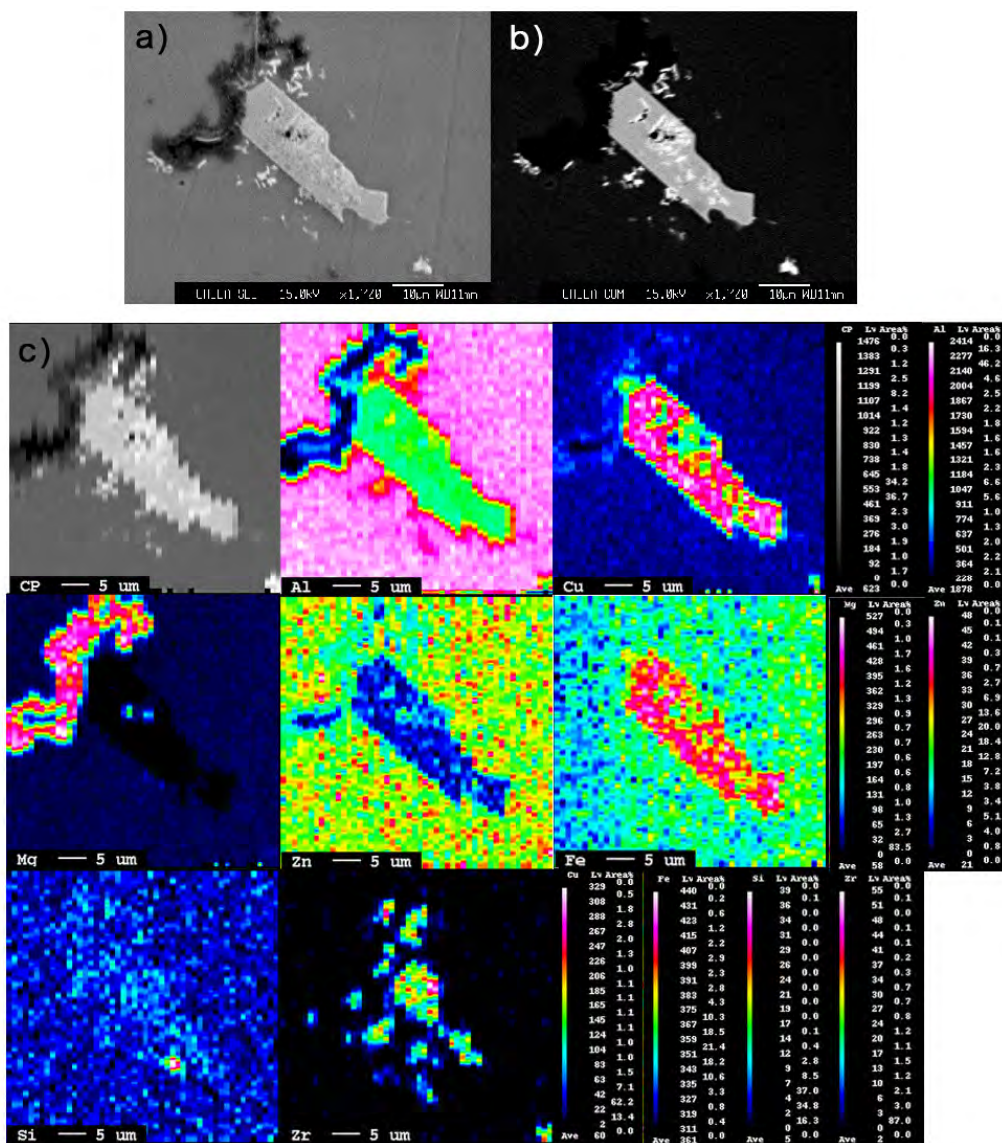
ภาพที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนช่วงการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ด้วยเครื่องมือ DTA

การตรวจสอบและวิเคราะห์เฟสของชิ้นงานในการทดลองนี้จะใช้ภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Backscattered electron และ Electron Probe Microscope Analyzer (EPMA)



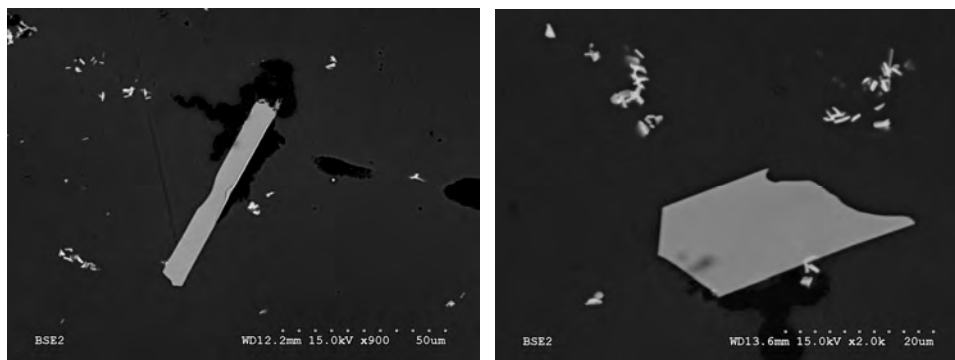
ภาพที่ 4.38 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 590 °C

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 590 °C จะพบเฟส  $\alpha$  (Al) กับเฟสของเหลว (Liquid) เพราะเป็นอุณหภูมิระหว่างเส้น Liquidus และ Solidus ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวไม่มาก ซึ่งเกิดความสมดุลระหว่างเฟส  $\alpha$  (Al) กับเฟสของเหลว (Liquid) ดังภาพที่ 4.37



ภาพที่ 3.39 a) Secondary Electron Image, b) Backscattered Electron Image  
c) X-Ray Maps ของเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu  
ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 515 °C

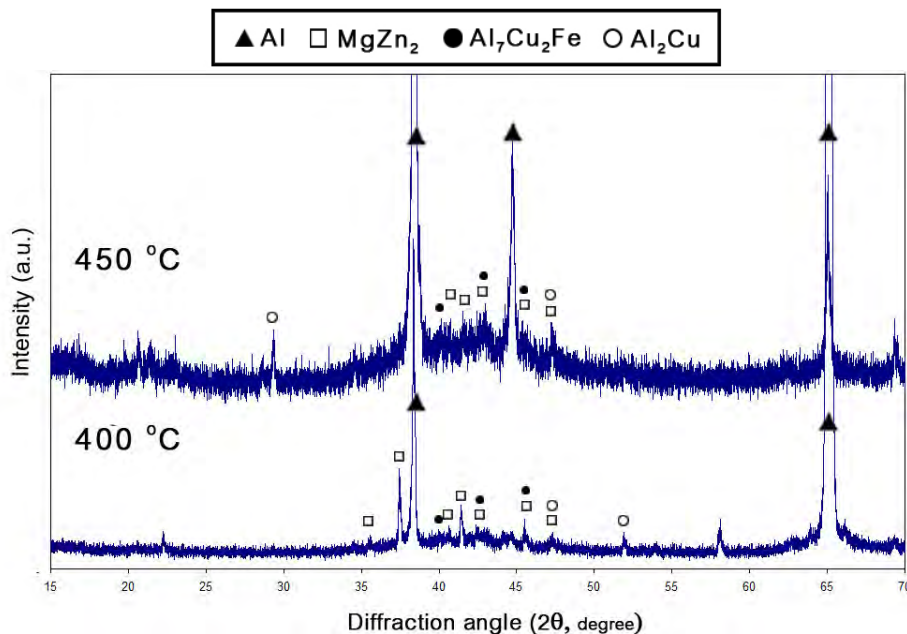
ในโครงสร้างที่อุณหภูมิ 515 °C พบเฟสเนื้อพื้น  $\alpha$  (Al) และเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  โดยการนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเทคนิค Mapping analysis ดังภาพที่ 4.39 โดยเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น นอกจากนี้ยังพบเฟสที่มีลักษณะเป็นดาวกระจายอยู่ตามเนื้อพื้นซึ่งเป็นเฟส  $Al_3Zr$  ดังแสดงใน X-ray maps ภาพที่ 4.39 c) และภาพที่ 4.40 แสดงเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  ลักษณะต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu$  ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 515 °C



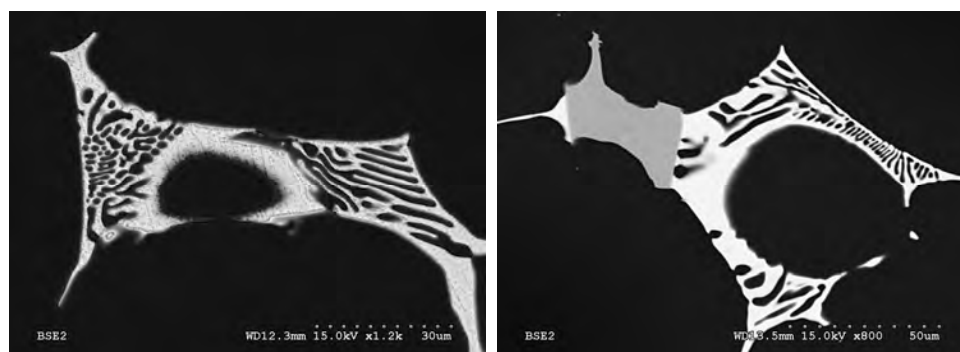
ภาพที่ 4.40 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu$  ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 515 °C

และจากการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu$  ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 450 และ 400 °C มีเฟสที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ใกล้เคียง จาก X-ray diffraction patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu$  ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 และ 450 °C มีพีคของเฟส  $\alpha$  (Al),  $\eta$  ( $MgZn_2$ ),  $Al_7Cu_2Fe$  และ  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) โดยพีคที่ปรากฏใน X-ray diffraction patterns ดังภาพที่ 4.41 มีพีคที่ไม่ชัดเจนเนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการทดลอง Interrupted solidification มีลักษณะเป็นรูและเป็นโพรงทั่วชิ้นงานจึงทำให้เกิดปัญหาด้านการหักเหของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงาน โดยการตรวจสอบโครงสร้างภายในของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu$  ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 450 และ 400 °C มีโครงสร้าง Lamellar ที่ส่วนใหญ่เป็นเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) สลับกับเฟส  $\alpha$  (Al) ดังภาพที่ 4.42 และ 4.43 และเมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่อง EPMA ด้วยเทคนิค Mapping analysis ดังภาพที่ 4.44 พบว่ามีเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ที่มีธาตุสังกะสี, แมกนีเซียม และทองแดง ละลายอยู่ด้วยกันที่บริเวณโครงสร้าง Lamellar โดยวางตัวสลับกับเฟส  $\alpha$  (Al) (ภาพที่ 4.44 a) ตำแหน่ง A) และพบเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  ในตำแหน่ง B ภาพที่ 4.44 a) เป็นบริเวณที่มีธาตุ Fe หนาแน่นมากเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น นอกจากนี้ยังพบเฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมแยกตัว

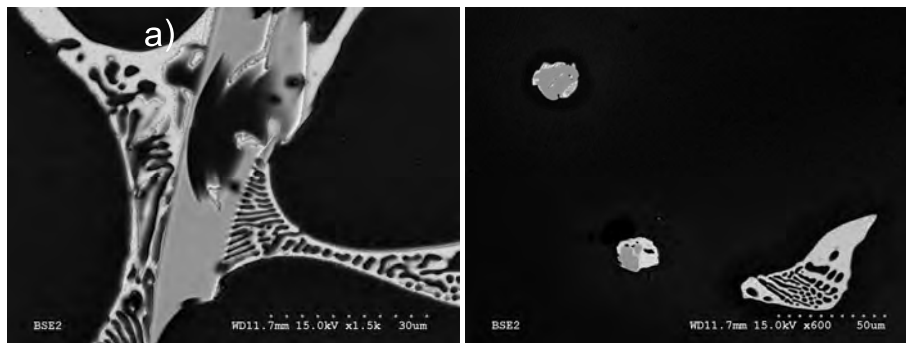
ออกมาอยู่ภายในเกรน อยู่ร่วมกับเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) และ เฟส  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  ภายในโครงสร้างที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  ดังภาพที่ 4.45 โดยเฟส  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) จะมีปริมาณของธาตุ Al และ Cu หนาแน่น อยู่ภายในเฟสเห็นได้จาก X-ray maps และมีเฟสที่สว่างกว่าเป็นเฟส  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) และเฟสภายใน วงรีสีแดงดังภาพที่ 4.45 เป็นเฟส  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  ที่มีสีเข้มซึ่งมีปริมาณของธาตุ Fe หนาแน่น



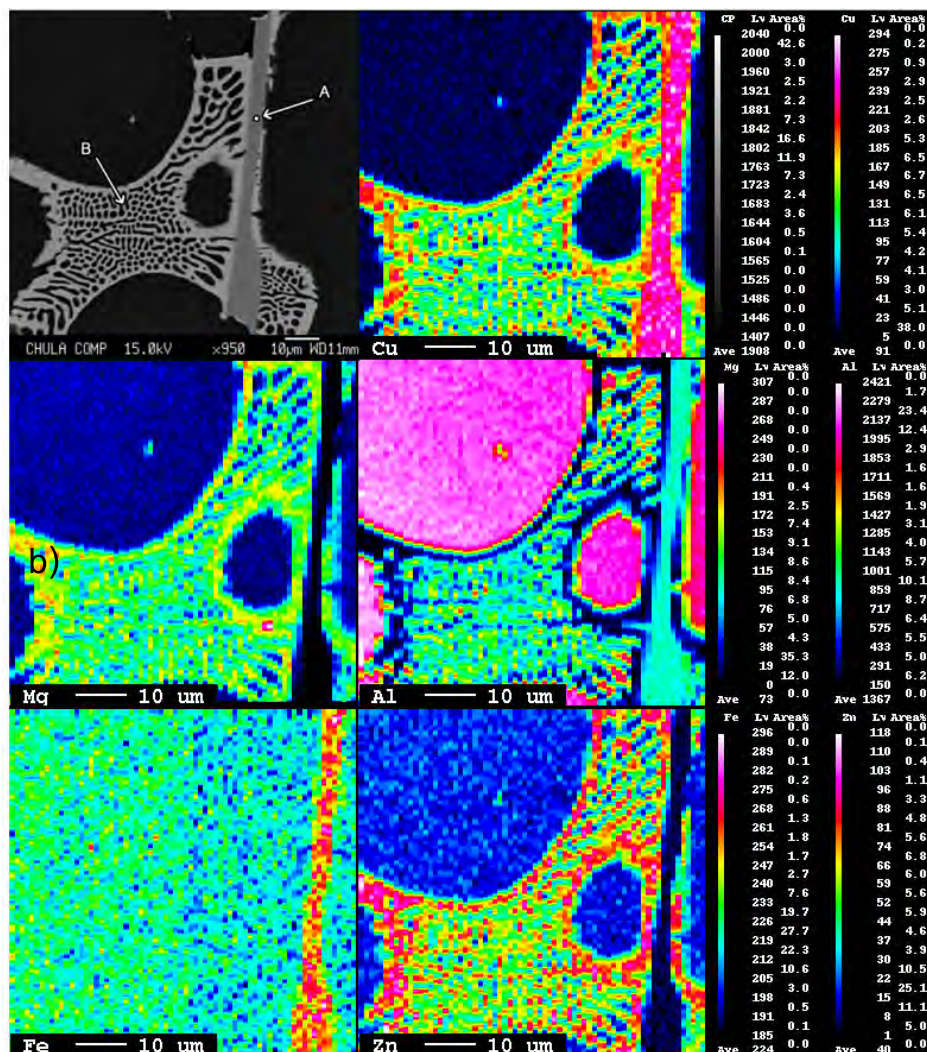
ภาพที่ 4.41 X-Ray Diffraction Patterns ของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu}$  ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ  $400$  และ  $450^\circ\text{C}$



ภาพที่ 4.42 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu}$  ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$

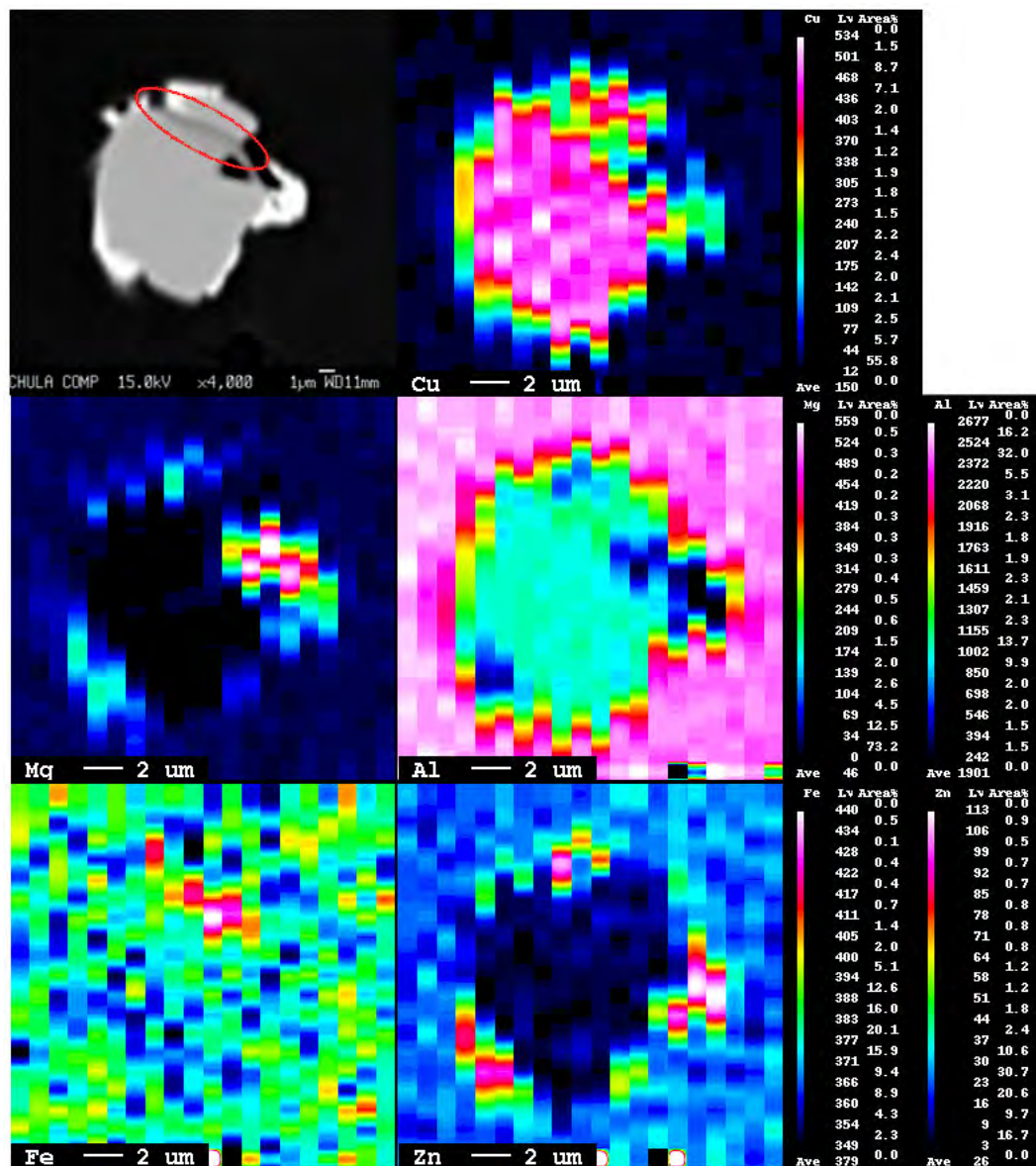


ภาพที่ 4.43 Backscattered Electron Image ที่กำลังขยายสูงของโลหะผสมอะลูมิเนียม  
Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 °C



ภาพที่ 4.44 a) Backscattered Electron Image b) X-Ray Maps ของโครงสร้างยูเทคติกภายใน  
โครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu  
ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 °C





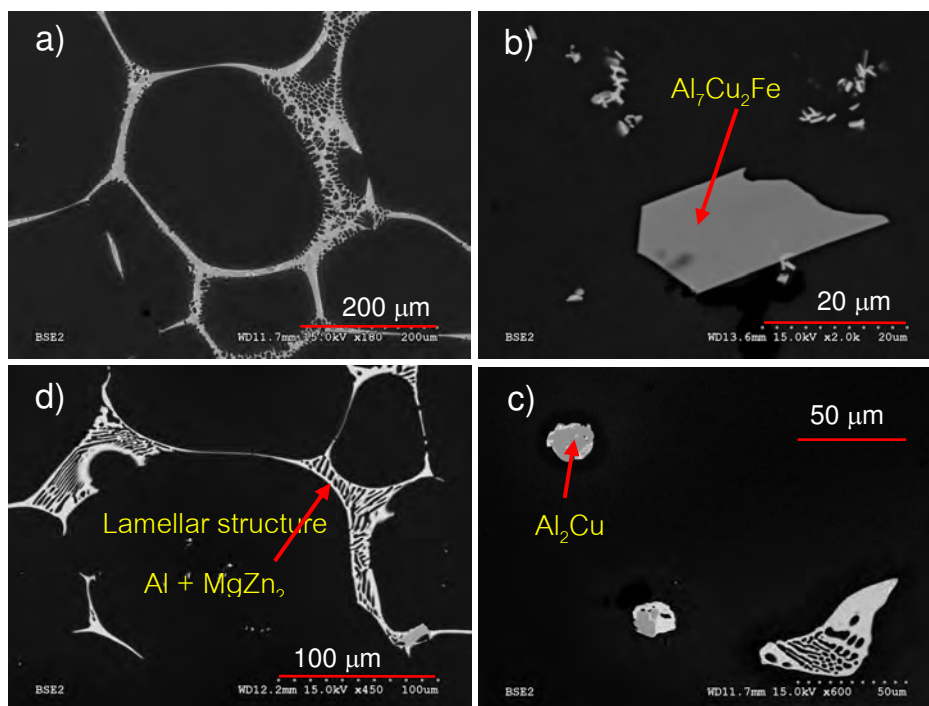
ภาพที่ 4.45 X-Ray Maps ของเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม

Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ศึกษาการเกิดเฟสที่อุณหภูมิ 400 °C

จากผลการศึกษาลำดับการเกิดเฟสด้วยวิธี Interrupted Solidification พบว่ามีโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัันดังภาพที่ 4.46 ซึ่งสามารถสรุปลำดับการเกิดเฟสดังนี้

(1) Liquid ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ )  $\rightarrow$  (2) Liquid + Al  $\rightarrow$  (3) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$   $\rightarrow$  (4) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  +  $\text{MgZn}_2$   $\rightarrow$  (5) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  +  $\text{MgZn}_2$  +  $\text{Al}_2\text{Cu}$

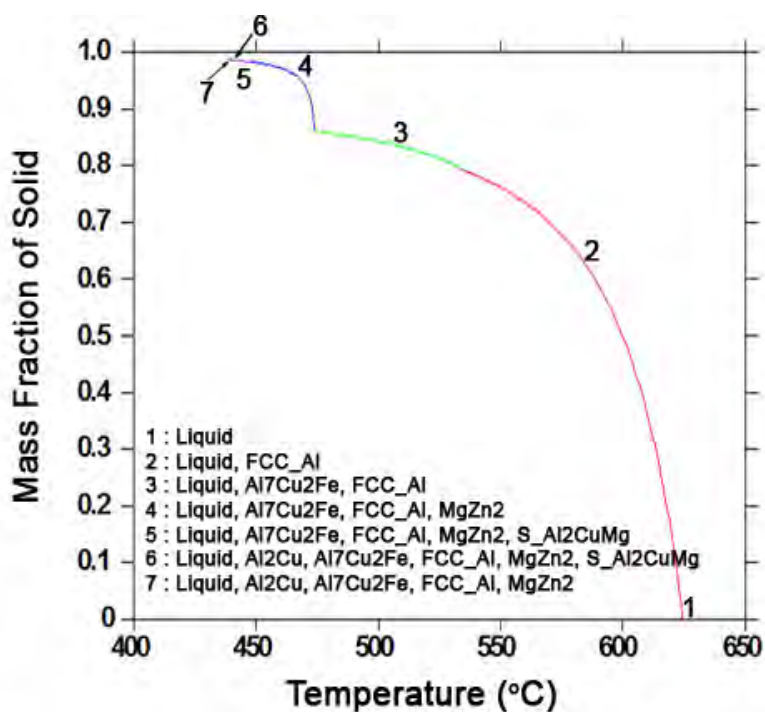
โดยเฟส  $\text{Al}_3\text{Zr}$  เป็นเฟสปฐมภูมิ (Primary phase) ที่เกิดขึ้นก่อนเฟสอื่น ๆ เพราะโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการหล่อด้วยเทคนิคแบบ LFEC พบว่ามีเฟส  $\text{Al}_3\text{Zr}$  ปรากฏอยู่บริเวณตรงกลางเกรน แต่ในการพิจารณาลำดับการเกิดเฟสในหัวข้อนี้จะไม่พิจารณาเฟส  $\text{Al}_3\text{Zr}$  ในการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Thermo Calc. เพราะโปรแกรม Thermo Calc. ไม่มีข้อมูลของเฟส  $\text{Al}_3\text{Zr}$  ในการคำนวณ



ภาพที่ 4.46 Backscattered Electron Image แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม  $\text{Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu}$  ที่อุณหภูมิ a) 590 °C, b) 515 °C, c) 450 °C และ d) 400 °C

และจากการการคำนวณลำดับการเกิดเฟสด้วยโปรแกรม Thermal Calc ด้วยสมการ Scheil's Equation โดยผลการคำนวณลำดับการเกิดเฟสแสดงดังภาพที่ 4.47 โดยมีลำดับการเกิดเฟสดังนี้

(1) Liquid  $\rightarrow$  (2) Liquid + Al  $\rightarrow$  (3) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$   $\rightarrow$  (4) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  +  $\text{MgZn}_2$   $\rightarrow$  (5) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  +  $\text{MgZn}_2$  +  $\text{S}_{\text{Al}_2\text{CuMg}}$   $\rightarrow$  (6) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  +  $\text{MgZn}_2$  +  $\text{S}_{\text{Al}_2\text{CuMg}}$  +  $\text{Al}_2\text{Cu}$   $\rightarrow$  (7) Liquid + Al +  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  +  $\text{MgZn}_2$  +  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ตามลำดับการเกิดเฟส โดยสถานะสุดท้ายจะเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) ได้หายไป



ภาพที่ 4.47 ลำดับการเกิดเฟสจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Thermal Calc คำนวณจากสมการ Scheil's Equation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองด้วยวิธี Interrupted Solidification พบว่ามีลำดับการเกิดเฟสที่ใกล้เคียงกันแต่การคำนวณด้วยโปรแกรม Thermal Calc มีเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) โดยการทดลอง Interrupted solidification ไม่พบเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) โดยอาจเกิดเฟสดังกล่าวขึ้น แต่มีปริมาณที่น้อยจึงไม่สามารถตรวจพบได้ภายในโครงสร้าง ซึ่งในการทดลองมีเฟส  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) เกิดขึ้นด้วย ซึ่งจากการตรวจสอบเฟสภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังจากกระบวนการหล่อด้วยเทคนิค LFEC ไม่สามารถพบเจอเฟส  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) เพราะมีปริมาณน้อย และบริเวณที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นบริเวณที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของชิ้นงานภายหลังจากการหล่อ แต่การทำ Interrupted Solidification ยืนยันว่าเกิดเฟส  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) ภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu ด้วย

โดยผลการศึกษาลำดับการเกิดเฟส พบว่ามีเฟส Al,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ),  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ),  $\text{Al}_3\text{Zr}$  และ  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ซึ่งมีชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นเหมือนกับเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการหล่อด้วยเทคนิค LFEC แต่ชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการหล่อด้วยเทคนิค LFEC ยังพบเฟส S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) และ T ( $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$ ) ด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการหล่อจะมีปริมาณลดลงตามปริมาณของธาตุผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ลดลง โดยปริมาณของแมกนีเซียมส่งผลกระทบท่อปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกมากกว่าสังกะสีและทองแดง

2. โครงสร้างยูเทคติกภายในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมมีลักษณะเป็นโครงสร้าง Lamellar โดยมีเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ที่มีทองแดงละลายอยู่ภายในเฟส เป็นเฟสหลักของโครงสร้างยูเทคติก วางตัวสลับกับเฟส  $\alpha$  (Al) นอกจากนี้เฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ยังมีลักษณะเป็นเฟสที่แยกตัวออกมามีลักษณะเป็นทรงกลม สำหรับเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) และ  $Al_7Cu_2Fe$  มีการกระจายตัวอยู่ตามโครงสร้างยูเทคติกในโลหะผสมอะลูมิเนียมทุกส่วนประกอบทางเคมี โดยเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมวางตัวอยู่บนโครงสร้างยูเทคติก เฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) สามารถเจอในโลหะผสมอะลูมิเนียมทุกส่วนประกอบทางเคมีแต่มีปริมาณที่น้อยมาก โดยปริมาณของเฟส  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) ขึ้นอยู่กับปริมาณของทองแดงในโลหะผสมอะลูมิเนียม และเฟส T ( $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ) สามารถเจอเด่นชัดในโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-6.4Zn-3.0Mg-1.4Cu (wt %) ซึ่งมีอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อสังกะสีสูงสุดในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3. โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว พบว่าโครงสร้างยูเทคติกจะมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาของกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว โดยโครงสร้างยูเทคติกจะมีลักษณะไม่เชื่อมต่อนี้กันและกัน โดยเฟส  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) มีปริมาณลดลงอย่างเห็นเด่นชัดในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเป็นระยะเวลา 600 นาที แต่สำหรับเฟส  $Al_7Cu_2Fe$  ยังคงอยู่ภายในโครงสร้าง แต่มีลักษณะที่เล็กและบางเมื่อเทียบกับสถานะภายหลังกระบวนการหล่อ นอกจากนี้ยังสามารถพบเฟส S ( $Al_2CuMg$ ) ภายในโครงสร้างภายหลังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว

4. ลำดับการเฟสของโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10.0Zn-2.5Mg-2.3Cu (wt%) ที่ผ่านการทดลองด้วยวิธี Interrupted Solidification พบว่ามีลำดับการเกิดเฟสดังนี้ (1) Liquid  $\rightarrow$  (2) Liquid + Al  $\rightarrow$  (3) Liquid + Al +  $Al_7Cu_2Fe$   $\rightarrow$  (4) Liquid + Al +  $Al_7Cu_2Fe$  +  $MgZn_2$   $\rightarrow$  (5) Liquid + Al +  $Al_7Cu_2Fe$  +  $MgZn_2$  +  $Al_2Cu$  ซึ่งผลลำดับการเกิดเฟสส่วนใหญ่สอดคล้องกับ

การคำนวณด้วยโปรแกรม Thermal Calc และพบว่าเมื่อเฟสเกิดขึ้นตรงกับผลการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมภายหลังจากกระบวนการหล่อด้วยเทคนิค LFEC

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการวัดปริมาณของเฟสต่าง ๆ ภายในโครงสร้างเพื่อสามารถเปรียบเทียบปริมาณของเฟสต่าง ๆ กับส่วนประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงของโลหะผสมอะลูมิเนียม

2. ในการทดลองด้าน Interrupted Solidification พบว่ามีปัญหาด้านการจุ่มชิ้นงานลงน้ำ (Quenching) เพื่อศึกษาโครงสร้างในช่วงอุณหภูมินั้น ดังนั้นควรศึกษาเทคนิคด้านการจุ่มชิ้นงานลงน้ำ (Quenching) เพื่อให้อัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วเพื่อความแม่นยำต่อสถานะของชิ้นงานที่ทำการศึกษา

## รายการอ้างอิง

- [1] I. J. Polmear. **Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals.** United Kingdom : Arnold, 1995.
- [2] Zuo Yubo, Cui Jianzhong, Zhao Zhihao, Zhang Haitao and Qin Ke. Effect of low frequency electromagnetic field on casting crack during DC casting superhigh strength aluminum alloy ingots. **Materials Science and Engineering. A 406 (2005) :** 286-292.
- [3] มนัส สติรจินดา. **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก.** กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [4] วิลเลียม เอฟ สมิธ. **วัสดุวิศวกรรม.** แปลโดย แม่น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท็อป, 2546.
- [5] ASM International. **Aluminum and Aluminum Alloys.** United States of America : ASM Specialty Handbook, 1996.
- [6] Xigang Fan, Daming Jiang, Qingchang Meng and Li Zhong. The microstructural evolution of an Al-Zn-Mg-Cu alloy during homogenization. **Materials Letters. 60 (2006) :** 1475-1479.
- [7] Merton C. Fleming, **Solidification Processing.** United States of America: McGraw Hill, 1974.
- [8] Materials Science and International Team. **Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology.** Vol. 11: Ternary Alloy Systems. Germany: Springer, 2005.
- [9] Haitao Zhang, Hiromi Nagaumi, Yubo Zuo and Jianzhong Cui. Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during low frequency electromagnetic casting of 7XXX aluminum alloys Part 1: Development of a mathematical model and comparison with experimental results. **Materials Science and Engineering. A 448 (2007) :** 189-203.

- [9] J. Donga, J.Z. Cui, F.X. Yu, Z.H. Zhao and Y.B. Zhuo. A new way to cast high-alloyed Al-Zn-Mg-Cu-Zr for super-high strength and toughness. **Journal of Materials Processing Technology**. 171 (2006) : 399-404.
- [10] Yubo Zuo, Jianzhong Cui, Jie Dong and Fuxiao Yu. Effect of low frequency electromagnetic field on the constituents of a new super high strength aluminum alloy. **Journal of Alloys and Compounds**. 402 (2005) : 149-155.
- [11] Yanxia li, Ping Li, Gang Zhao, Xiaotao Liu and Jianzhong Cui. The constituents in Al-10Zn-2.5Mg-2.5Cu aluminium alloy. **Materials Science and Engineering**. A397 (2005) : 204-208.
- [12] Chandan Mondal and A.K. Mukhopadhyay. On the nature of T(Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>) and S(Al<sub>2</sub>CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy. **Materials Science and Engineering**, A 391 (2005) : 367-376.
- [13] อธิพิพล เตี้ยววานิชย์, **กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงสำหรับการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะ**. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย
- [14] Yubo Zuo, Jianzhong Cui, Jie Dong and Fuxiao Yu. Effect of low frequency electromagnetic field on the as-cast microstructures and mechanical properties of superhigh strength aluminum alloy. **Materials Science and Engineering**. A408 (2005) : 176-181.
- [15] เสริมยุทธ แต้มเกิด. **พฤติกรรมการณ์แข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงความแข็งแรงสูงมากพิเศษที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [16] B.D Cullity. **Elements of X-Ray Diffraction**. United States of America : Addison-Wesley Publishing Company, 1959.

- [17] David R. Poirier and Gordon H. Geiger. *Transport Phenomena in Materials Processing*. United States of America : The Minerals, Metals & Material Society, 1994.
- [18] แชนวัญ โก้สุโข. โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อและโครงสร้างจุลภาคภายหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al - 10Zn - 1-2.5Mg - 1-2.3Cu - 0.14Zr) ที่หล่อด้วยกระบวนการ Direct Chill ภายใต้การกวนของแม่เหล็กไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [19] Carroll Croarkin and Paul Tobias. *Engineering Statistics Handbook* [Online]. 2003. Available from: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>



ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างแสดงปริมาณธาตุผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน

รหัส	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	ซิลิคอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
7001	0.35	0.40	1.6-2.6	0.20	2.6-3.4	0.18- 0.35	6.8-8.0
7003	0.30	0.35	0.20	0.30	0.5-1.00	0.20	5.0-6.5
7004	0.25	0.35	0.05	0.20-0.70	1.0-2.0	0.05	3.8-4.6
7005	0.35	0.40	0.10	0.20-0.70	1.0-1.8	0.06- 0.20	4.0-5.0
7008	0.10	0.10	0.05	0.05	0.7-1.4	0.12- 0.25	4.5-5.5
7108	0.10	0.10	0.05	0.05	0.7-1.4	-	4.5-5.5
7009	0.20	0.20	0.6-1.3	0.10	2.1-2.9	0.10- 0.25	5.5-5.6
7109	0.10	0.15	0.8-1.3	0.10	2.2-2.7	0.04- 0.08	5.8-6.5
7010	0.12	0.15	1.5-2.0	0.10	2.1-2.6	0.05	5.7-6.7
7011	0.15	0.20	0.05	0.10-0.30	1.0-1.6	0.05- 0.20	4.0-5.5
7012	0.15	0.25	0.8-1.2	0.08-0.15	1.8-2.2	0.04	5.8-6.5
7013	0.6	0.7	0.10	1.0-1.5	-	-	1.5-2.0
7014	0.5	0.5	0.30- 0.70	0.30-0.70	2.2-3.2	-	5.2-6.2

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ตัวอย่างแสดงปริมาณธาตุผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน

รหัส	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	ซิลิคอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
7015	0.20	0.30	0.06- 0.15	0.10	1.3-2.1	0.15	4.6-5.2
7016	0.10	0.12	0.45-1.0	0.03	0.8-1.4	-	4.0-5.0
7116	0.15	0.30	0.5-1.1	0.05	0.8-1.4	-	4.2-5.2
7017	0.35	0.45	0.20	0.50-0.5	2.0-3.0	0.35	4.0-5.2
7018	0.35	0.45	0.20	0.15-0.50	0.7-1.5	0.20	4.5-5.5
7019	0.35	0.45	0.20	0.15-0.50	1.5-2.5	0.20	3.5-4.5
7020	0.35	0.40	0.20	0.05-0.5	1.0-1.4	0.10- 0.35	4.0-5.0
7021	0.25	0.40	0.25	0.10	1.2-1.8	0.05	5.0-6.0
7022	0.50	0.50	0.5-1.0	0.1-0.4	2.6-3.7	0.1-0.3	4.3-5.2
7023	0.5	0.5	0.5-1.0	0.1-0.6	2.0-3.0	0.05- 0.35	4.0-6.0
7024	0.3	0.4	0.1	0.1-0.6	0.5-1.0	0.05- 0.35	3.0-5.0
7025	0.3	0.4	0.1	0.1-0.6	0.8-1.5	0.05- 0.35	3.0-5.0
7026	0.8	0.12	0.6-0.9	0.05-0.2	1.5-1.9	-	4.6-5.2
7027	0.25	0.40	0.1-0.3	0.1-0.4	0.7-1.1	-	3.5-4.5
7028	0.35	0.50	0.1-0.3	0.15-0.6	1.5-2.3	0.2	4.5-5.2
7029	0.1	0.12	0.5-0.9	0.03	1.3-2.0	-	4.2-5.2
7129	0.15	0.3	0.5-0.9	0.10	1.3-2.0	0.10	4.2-5.2

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ตัวอย่างแสดงปริมาณธาตุผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่นิยมใช้  
งานในปัจจุบัน

รหัส	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	ซิลิคอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
7229	0.06	0.08	0.5-0.9	0.03	1.3-2.0	-	4.2-5.2
7030	0.20	0.30	0.20- 0.40	0.05	1.0-1.5	0.04	4.8-5.9
7039	0.30	0.40	0.10	0.1-0.4	2.3-3.3	0.15- 0.25	3.5-4.5
7046	0.2	0.40	0.25	0.30	1.0-1.6	0.2	6.6-7.6
7146	0.2	0.4	-	-	0.1-1.6	-	6.6-7.6
7049	0.25	0.35	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10- 0.22	7.2-8.2
7149	0.15	0.20	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10- 0.22	7.2-8.2
7050	0.12	0.15	2.0-2.6	0.10	1.9-2.6	0.04	5.7-6.7
7150	0.12	0.15	1.9-2.5	0.10	2.0-2.7	0.04	5.9-6.9
7051	0.35	0.45	0.15	0.10-0.45	1.7-2.5	0.05- 0.25	3.0-4.0
7060	0.15	0.20	1.8-2.6	0.2	1.3-2.1	0.15- 0.25	6.1-7.5
7064	0.12	0.15	1.8-2.4	-	1.9-2.9	0.06- 0.25	6.8-8.0
7072	(Si+Fe ≤ 0.7)	0.1	0.1	0.1	-	0.8-1.3	-

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ตัวอย่างแสดงปริมาณธาตุผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ที่นิยมใช้  
งานในปัจจุบัน

รหัส อะลูมิเนียม ผสม ประเภทขั้น รูปเย็น	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	ซิลิคอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
7278	0.15	0.20	1.6-2.2	0.02	2.5-3.2	0.17- 0.25	6.6-7.4
7079	0.3	0.4	0.4-0.8	0.1-0.3	2.9-3.7	0.1-0.25	3.8-4.8
7179	0.15	0.20	0.4-0.8	0.1-0.3	2.9-3.7	0.1-0.25	3.8-4.8
7090	0.125	0.15	0.6-1.3	-	2.0-3.0	-	7.7-8.7
7091	0.12	0.15	1.1-1.8	-	2.0-3.0	-	5.8-7.1
7175	0.15	0.20	1.2-2.0	0.1	2.1-2.9	0.18- 0.28	5.1-6.1
7475	0.10	0.12	1.2-1.9	0.06	1.9-2.6	0.18- 0.25	5.2-6.2
7076	0.40	0.6	0.3-1.0	0.3-0.8	1.2-2.0	-	7.0-8.0
7277	0.5	0.7	0.8-1.7	-	1.7-2.3	0.18- 0.35	3.7-4.3
7178	0.4	0.5	1.6-2.4	0.3	2.4-3.1	0.18- 0.28	6.3-7.3
7472	0.25	0.6	0.05	0.05	0.9-1.5	-	1.3-1.9
7075	0.42	0.50	1.2-2.0	0.3	2.1-2.9	0.18- 0.28	5.1-6.1

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างแสดงคุณสมบัติทางกลและลักษณะการใช้งานของโลหะผสมอะลูมิเนียม  
กลุ่ม 7XXX ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน

รหัส	ส่วนผสม	คุณสมบัติทางกลในค่าสูงสุด			การใช้งาน
		Tensile strength (MPa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)	
7005	4.6Zn-1.4Mg – 0.5Mn-0.1Cr – 0.1Zr– 0.03Ti	641	483	16	ขอบวางรถไฟ, อุปกรณ์ยึด มุม, ตู้คอนเทนเนอร์, ไม้ เทนนิส, ไม้เบสบอล
7039	4Zn-2.8Mg – 0.2Mn-0.2Cr	450	400	12	ถังบรรจุสารเคมีประเภท สารอินทรีย์, ถังบรรจุอัด ความดัน, อุปกรณ์รถถัง โครงสร้างจรวดมิสไซล์
7049	7.6Zn-2.5Mg- 1.5Cu-0.15Cr	538	490	7	โครงสร้างเครื่องบิน, โครงสร้างจรวดมิสไซล์, เกี่ยวใช้ในการลงจอด
7050	6.2Zn-2.3Mg – 2.3Cu- 0.12Zr	510	496	12	โครงสร้างเครื่องบินที่ผ่าน การดึงขึ้นรูป (Extrusion) หรือการ Forgings
7075	5.6Zn-2.5Mg – 1.6Cu -0.23Cr	703	634	9	โครงสร้างเครื่องบิน
7076	7.5Zn-1.6Mg – 0.55Mn-0.65Cu	485	415	14	ใบพัดเครื่องบิน
7175	5.6Zn-2.5Mg – 1.6Cu-0.23Cr	593	524	11	โครงสร้างเครื่องบิน
7178	6.8Zn-2.7Mg – 2.0Cu -0.3Cr	440	420	15	โครงสร้างและในส่วนของ เครื่องบินหรือยานอวกาศ
7475	5.7Zn-2.3Mg- 1.5Cu-0.22Cr	683	600	10	ลำตัวเครื่อง, ปีกและผนัง เครื่องบิน

## ภาคผนวก ข

ขอบเขตความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของข้อมูล (Confidence limits for mean) [19]

$$\text{Confidence limits for mean} = \bar{x} \pm \frac{t_{(\alpha/2, N-1)} \cdot S}{\sqrt{N}} \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

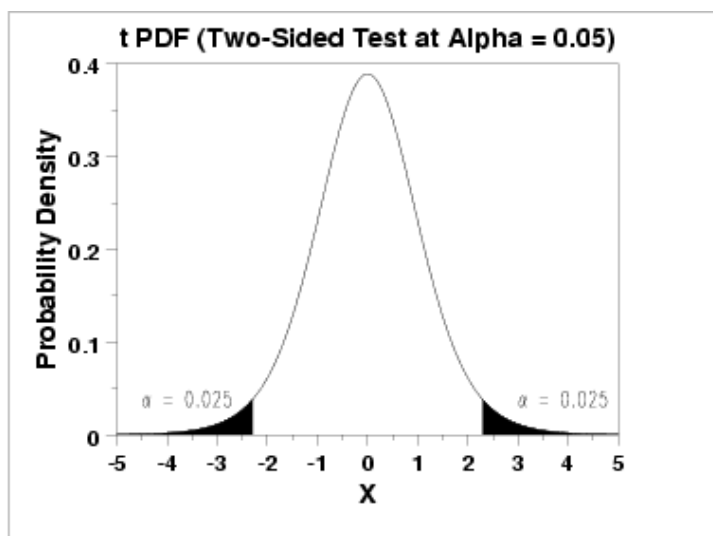
เมื่อ  $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของกลุ่มตัวอย่างขนาด  $N$  ที่สุ่มมาจาก  
ตัวอย่างทั้งหมด

$N$  คือ จำนวนข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง

$S$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง

$t$  คือ ค่าวิกฤติของการกระจายแบบ  $t$  ซึ่งมีองศาความเป็นอิสระ  $N-1$   
และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น  $1 - \alpha$

โดยช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ในงานวิจัยนี้  
ใช้  $\alpha$  เท่ากับ 0.05 โดยช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจะให้ค่าความเชื่อมั่นของข้อมูล 95%



ภาพที่ ข.1 ตัวอย่างกราฟการกระจายแบบ  $t$  ที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 10

ภาพที่ ข.1 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายแบบ t ที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 10 และใช้  $\alpha$  เท่ากับ 0.05 โดยกราฟเป็นกราฟแบบสองด้าน (Two-side test) ซึ่ง  $\alpha/2$  เท่ากับ 0.025 โดยสามารถอ่านค่าวิกฤติบน (t) จากฝั่งขวามือของกราฟได้ประมาณ 2.228

ตารางที่ ข.1 ค่าวิกฤติบน (t) ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างองศาความอิสระกับช่วงความมั่นใจของข้อมูล [19]

Degree of freedom	Upper critical values						
	75%	80%	85%	90%	95%	97.5%	99%
1	1.00	1.38	1.96	3.08	6.31	12.71	31.82
2	0.82	1.06	1.39	1.89	2.92	4.30	6.97
3	0.77	0.98	1.25	1.64	2.35	3.18	4.54
4	0.74	0.94	1.19	1.53	2.13	2.78	3.75
5	0.73	0.92	1.16	1.48	2.02	2.57	3.37
6	0.72	0.91	1.13	1.44	1.94	2.45	3.14
7	0.71	0.90	1.12	1.42	1.90	2.37	3.00
8	0.71	0.89	1.11	1.40	1.86	2.31	2.90
9	0.70	0.88	1.10	1.38	1.83	2.26	2.82
10	0.70	0.88	1.09	1.37	1.81	2.23	2.76
11	0.70	0.88	1.09	1.36	1.80	2.20	2.72
12	0.70	0.87	1.08	1.36	1.78	2.18	2.68
13	0.69	0.87	1.08	1.35	1.77	2.16	2.65
14	0.69	0.87	1.08	1.35	1.76	2.15	2.62
15	0.69	0.87	1.07	1.34	1.75	2.13	2.60
16	0.69	0.87	1.07	1.34	1.75	2.12	2.58
17	0.69	0.86	1.07	1.33	1.74	2.11	2.57
18	0.69	0.86	1.07	1.33	1.73	2.10	2.55
19	0.69	0.86	1.07	1.33	1.73	2.09	2.54



ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ค่าวิกฤติบน (t) ที่เป็นการสัมพันธ์ระหว่างองศาความอิสระกับช่วงความมั่นใจ  
ของข้อมูล

Degree of freedom	Upper critical values						
	75%	80%	85%	90%	95%	97.5%	99%
20	0.69	0.86	1.06	1.33	1.73	2.09	2.53
21	0.69	0.86	1.06	1.32	1.72	2.08	2.52
22	0.69	0.86	1.06	1.32	1.72	2.07	2.51
23	0.69	0.86	1.06	1.32	1.71	2.07	2.50
24	0.69	0.86	1.06	1.32	1.71	2.06	2.49
25	0.68	0.86	1.06	1.32	1.71	2.06	2.49
26	0.68	0.86	1.06	1.32	1.71	2.06	2.48
27	0.68	0.86	1.06	1.31	1.70	2.05	2.47
28	0.68	0.86	1.06	1.31	1.70	2.05	2.47
29	0.68	0.85	1.06	1.31	1.70	2.05	2.46
30	0.68	0.85	1.06	1.31	1.70	2.04	2.46
40	0.68	0.85	1.05	1.30	1.68	2.02	2.42
50	0.68	0.85	1.05	1.30	1.68	2.01	2.40
60	0.68	0.85	1.05	1.30	1.67	2.00	2.39
80	0.68	0.85	1.04	1.29	1.66	1.99	2.37
100	0.68	0.85	1.04	1.29	1.66	1.98	2.36
120	0.68	0.85	1.04	1.29	1.66	1.98	2.36
$\infty$	0.67	0.84	1.04	1.28	1.65	1.96	2.33

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นายปราโมทย์ ธีรทีปวิวัฒน์
วัน – เดือน – ปีเกิด	11 กรกฎาคม 2527
ที่อยู่	14/176 ม. 4 ซ.เอกชัย 30 แขวงบางขุนเทียน เขตจอมทอง กรุงเทพฯ 10150
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ (อัญมณีและเครื่องประดับ) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปี 2549
โทรศัพท์ติดต่อ	089-497-1643