

พฤติกรรมการแข่งขันของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง
ความแข็งแรงสูงมากพิเศษที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้
การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายเสริมยุทธ เข้มเกตุ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

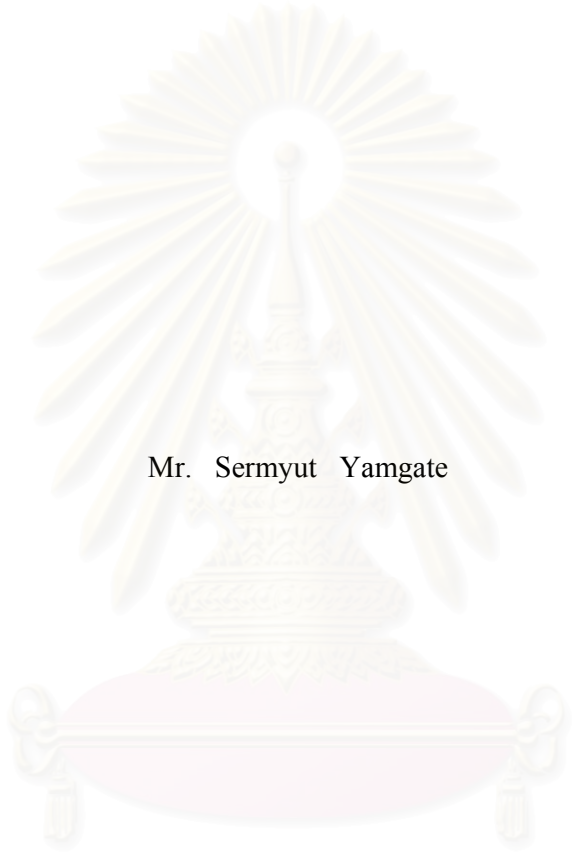
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOLIDIFICATION BEHAVIOR OF CONTINUOUSLY CAST SUPER HIGH
STRENGTH Al-Zn-Mg-Cu ALLOY INGOT UNDER THE APPLICATION OF
ELECTROMAGNETIC FIELD



Mr. Sermgut Yamgate

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

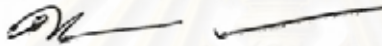
Chulalongkorn University

Academic Year 2006

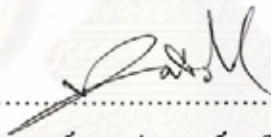
Copyright of Chulalongkorn University

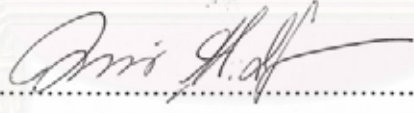
หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-
ทองแดง ความแข็งแรงสูงมากพิเศษที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อ
เนื่องภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
โดย นายเสริมยุทธ แฉ่มเกตุ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ ณ อยุรยา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม Professor Takateru Umeda, D.Eng.

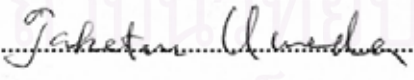
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

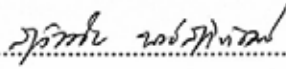
 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิเรก ลาวัณย์ศิริ)

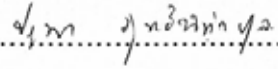
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ ณ อยุรยา)

 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(Professor Takateru Umeda, D.Eng.)

 กรรมการ
(อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์)

 กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

เสริมยุทธ แฉ้มเกตุ : พฤติกรรมการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ความแข็งแรงสูงมากพิเศษที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (SOLIDIFICATION BEHAVIOR OF CONTINUOUSLY CAST SUPER HIGH STRENGTH Al-Zn-Mg-Cu ALLOY INGOT UNDER THE APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD)
 อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ ณ อูรยา, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : PROFESSOR TAKATERU UMEDA, D. ENG., 79 หน้า.

การผลิตชิ้นส่วนงานอะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อใช้ในด้านการขนส่ง ในปัจจุบันนั้น มีการพัฒนาอะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงสูงมากพิเศษ แต่พบว่ามีข้อจำกัดในการหล่อแท่งโลหะด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Conventional DC casting) ที่เกิดการแตกร้าวภายในแท่งโลหะระหว่างการแข็งตัว จึงทำให้การผลิตเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก การจะป้องกันไม่ให้เกิดการแตกร้าวภายในแท่งโลหะระหว่างการแข็งตัวนั้น ต้องอาศัยการเกิดเกรนที่มีขนาดเล็กละเอียดสม่ำเสมอทั่วแท่งโลหะ ตลอดจนต้องไม่เกิดความเครียดเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกับอุณหภูมิที่ผิวของแท่งโลหะในปริมาณที่สูง ด้วยเหตุนี้การหล่อแบบต่อเนื่อง ภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ จะช่วยให้เกิดแรงกวนน้ำโลหะตลอดเวลา ระหว่างการแข็งตัวจึงส่งผลให้ได้แท่งโลหะที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียดและสม่ำเสมอ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ความแข็งแรงสูงมากพิเศษที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในแง่มุมของขนาดและการกระจายตัวของเกรนในโครงสร้างจุลภาค ตลอดจนการเกิดโครงสร้างยูเทคติกเฟสต่าง ๆ อันได้แก่ $Al+\eta(MgZn_2)$, $\alpha Al+\eta(MgZn_2)+T(Al-Zn-Mg-Cu)$ และ $\theta(CuAl_2)$ ที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวของแท่งโลหะ โดยที่ลำดับและปริมาณการเกิดขึ้นของโครงสร้างยูเทคติกเฟสต่าง ๆ นั้น ในงานวิจัยนี้ก็มีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการแข็งตัวจากการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงกับการคำนวณจากสมการการแข็งตัวในระบบของ Gulliver-Scheil

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา..... 2549ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4670576321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : SOLIDIFICATION BEHAVIOR / ELECTROMAGNETIC CASTING /

Al-Zn-Mg-Cu

SERMYUT YAMGATE : SOLIDIFICATION BEHAVIOR OF CONTINUOUSLY CAST SUPER HIGH STRENGTH Al-Zn-Mg-Cu ALLOY INGOT UNDER THE APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD. THESIS ADVISOR : Dr. MAWIN SUPRADIST NA AYUDHAYA, THESIS CO - ADVISOR : PROFESSOR TAKATERU UMEDA, D.ENG., 79pp.

The production of high strength Al-alloy is highly expected especially for the automobile application. A newly developed super high strength Al-Zn-Mg alloy, unfortunately, occurs easily the formation of cracks during solidification, which is so-called hot tearing (internal crack). Its application is severely limited due to the difficulty of obtaining sound ingots of this alloy through conventional direct chill casting (DC). To prevent hot tearing during solidification, fine grain size and minimum thermal stress generated in solidifying ingot are requested. Under a low frequency electromagnetic field, there is a forced convection in the melt during solidification, which results in the formation of finer and uniform grains. In this work the solidification behavior of billet under a low frequency electromagnetic field was investigated. The effect of electromagnetic force on grain refinement was firstly confirmed. Secondly solute redistribution or micro-segregation was measured and microscopic solidification progress was considered to compare the calculation describe solute redistributions which obtained from the assuming of Gulliver-Scheil equation as well as the formation of the smaller eutectic phases, such as α Al+ η (MgZn₂), α Al+ η (MgZn₂)+ T(Al-Zn-Mg-Cu) and θ (CuAl₂) were investigated.

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

Field of study ...Metallurgical Engineering...Advisor's signature.....

Academic year ...2006 Co-Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ Professor Takateru Umeda, อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อุษยา และอาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ เป็นอย่างสูงสำหรับการอุทิศงานและเวลาอันมีค่าของพวกท่านในการถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจและคำแนะนำต่างๆ ทั้งในด้านการเรียนและการทำงานด้วยความเมตตา ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล เดี่ยวณิชย์, คณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ทางด้านโลหะวิทยาในแขนงต่างๆ และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน, ครู ศิริรัตน์ นิสารัตนพร, พี่กิตติพงศ์ อัศดรวิเศษและเพื่อนๆ กลุ่มวิจัยการแข็งตัวของน้ำโลหะที่สละเวลาและแรงงานช่วยเหลือให้การทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนบริษัท Nippon Light Metal Company Ltd.(ประเทศญี่ปุ่น), บริษัท Thai Parkerizing Company Ltd. (ประเทศไทย) และ Mr. M. Ikeda มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่นที่ช่วยเหลือให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์สำหรับการทำงานวิจัย และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและบุคคลอันเป็นที่เคารพรักที่คอยให้กำลังใจอีกทั้งการสนับสนุนทางการศึกษา และให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 การศึกษาข้อมูลพื้นฐาน.....	8
2.1 ข้อมูลพื้นฐานของโลหะอะลูมิเนียม, โลหะอะลูมิเนียมผสม และ โลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นในกลุ่ม 7xxx (อะลูมิเนียมผสม สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง)ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรม.....	8
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์ แนวคิดและการพัฒนากระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้ การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Low frequency electromagnetic field) หรือ LFEC.....	16
2.3 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับรูปแบบและสมการการแข็งตัว.....	22
3. วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	32
3.1.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	32

สารบัญ

บทที่	หน้า
3. วิธีการดำเนินการวิจัย(ต่อ)	
3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	34
3.1.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบขนาดเกรนในโครงสร้างจุลภาค.....	35
3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	36
3.2.1 กล้องจุลทรรศน์แสง.....	36
3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกาวัด, Scanning Electron Microscope (SEM) ตรวจสอบโครงสร้าง ที่กำลังขยายสูงกว่า 1,000เท่า.....	36
3.2.3. การวิเคราะห์หาขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้าง ที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค.....	36
3.2.4 การคำนวณขนาดเกรนและศึกษาความสม่ำเสมอของ การกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	36
3.2.5 การใช้เครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) ตรวจสอบการกระจายตัวและวิเคราะห์ธาตุผสมในเนื้อโครงสร้าง และวิเคราะห์ธาตุผสมเพื่อระบุสารประกอบของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏ.....	41
3.3 การคำนวณเส้นทางและลำดับการแข็งตัวของโครงสร้างจุลภาค.....	43
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	51
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	51
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	52
5. สรุปผลวิจัย.....	74
รายการอ้างอิง.....	77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....	9
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....	9
ตารางที่ 2.3 รหัสธาตุผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็น.....	10
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลและลักษณะการใช้งานของ โลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx ที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบัน	12
ตารางที่ 2.5 ปริมาณธาตุผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx ที่นิยมใช้ในการผลิตอยู่ในปัจจุบัน.....	13
ตารางที่ 2.6 สมบัติเชิงกลเปรียบเทียบระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.....	20
ตารางที่ 2.7 ค่า D_0 และ Q ที่มีอิทธิพลมาจากธาตุผสมต่างๆ สำหรับหาค่า D_s ในโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	31
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมที่นำมาวิจัย.....	32
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบขนาดเกรนของบริเวณผิวชิ้นงาน, บริเวณระหว่างกึ่งกลางกับผิวชิ้นงาน และกึ่งกลาง.....	55
ตารางที่ 4.2 ขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคของ LFEC บริเวณต่างๆ.....	61
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี- แมกนีเซียม (% Composition) กับอุณหภูมิ (T).....	66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 กระบวนการหล่อ โดยอาศัยแม่เหล็กกวนน้ำโลหะ.....	17
ภาพที่ 2.2 Sump depth เปรียบเทียบระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.....	18
ภาพที่ 2.3 การกระจายตัวของธาตุผสมเปรียบเทียบระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.....	19
ภาพที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.....	20
ภาพที่ 2.5 แสดงเปรียบเทียบการเกิดรอยร้าวระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.....	21
ภาพที่ 2.6 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Equilibrium Solidification.....	24
ภาพที่ 2.7 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Gulliver-Scheil.....	26
ภาพที่ 2.8 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Clyne & Kurz.....	28
ภาพที่ 3.1 การตัดแบ่งชิ้นงาน.....	33
ภาพที่ 3.2 การทำปฏิกิริยาของการกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้างมหภาค.....	33
ภาพที่ 3.3 การตัดแบ่งชิ้นงานจากกึ่งกลางไปถึงผิวชิ้นงาน.....	35
ภาพที่ 3.4 วิธีการคำนวณขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท LFEC.....	37
ภาพที่ 3.5 การสร้างจุดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้คำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน.....	39
ภาพที่ 3.6 การคำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติก กับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานโดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏบนภาพถ่ายโครงสร้าง จุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดกำลังขยาย 1000 เท่า.....	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่3.7 ตัวอย่างการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA).....	42
ภาพที่3.8 แผนภูมิสมมูล Al-Mg.....	45
ภาพที่3.9 แผนภูมิสมมูล Al-Zn.....	46
ภาพที่3.10 แผนภูมิสมมูล Al-Cu.....	47
ภาพที่3.11 แผนภูมิสมมูล Al-Zn-Mg.....	48
ภาพที่4.1 ผลเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.....	51
ภาพที่4.2 ผลโครงสร้างจุลภาคของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC.....	52
ภาพที่4.3 ผลโครงสร้างจุลภาคของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท LFEC.....	53
ภาพที่4.4 โครงสร้างจุลภาคของLFEC บริเวณต่างๆโดยเริ่มจากซ้ายสุดคือผิวชิ้นงาน.....	56
ภาพที่4.5 กราฟขนาดเกรนของโครงสร้างจุลภาคของLFECบริเวณต่างๆ.....	57
ภาพที่4.6 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเกรนโครงสร้าง จุลภาคของLFEC.....	58
ภาพที่4.7 กราฟฮิสโทแกรมของขนาดเกรนโครงสร้างจุลภาคของLFEC.....	59
ภาพที่4.8 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาด สัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคของ LFEC.....	61
ภาพที่4.9 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)....	63
ภาพที่4.10 ภาพโครงสร้างยูเทคติกในโครงสร้างจุลภาคของLFECที่กำลังขยายสูง.....	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.11 ผลเส้นทางการเย็นตัวบนแผนภูมิสมดุล Al-Zn-Mg จากค่าความสัมพันธ ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี- แมกนีเซียม (% Composition) กับ อุณหภูมิ (T) ตามแบบสมการ Gulliver-Scheil's equation.....	67
ภาพที่ 4.12 ผลการคำนวณด้วย Thermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu.....	68
ภาพที่ 4.13 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs).....	72
ภาพที่ 4.14 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ที่ α คิดเป็น ค่าประมาณคือ 0.3	73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของการวิจัย

ชิ้นงานหล่อขึ้นรูปด้วยอะลูมิเนียมนั้น มีการคิดค้นและนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรม ตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 แล้วมีการเจริญเติบโตมาตามลำดับ โดยการใช้เพื่อเชิงการค้าในตอนแรกนั้น จะพบว่าเป็นการใช้เกี่ยวกับอุปกรณ์ในการทำครัว และอุปกรณ์เครื่องประดับตกแต่ง แต่ในปัจจุบันได้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลากหลายด้านของอุตสาหกรรม รวมถึงการนำธาตุผสมอื่นมาช่วยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติในด้านต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ หรือแม้กระทั่งสมบัติเชิงกลต่างๆ รวมไปถึงการปรับปรุงวิธีการหล่อขึ้นรูปให้เหมาะสมกับความต้องการและกำลังการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ตลอดจนการพัฒนาประยุกต์เทคโนโลยีต่างๆ ให้ทันสมัย ตอบสนองความต้องการและความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์จากอะลูมิเนียมหรืออะลูมิเนียมผสม

ในปัจจุบันการหล่ออะลูมิเนียมนั้นสามารถจำแนกวิธีการเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ 1. การหล่อในแบบหล่อ (Mold casting) ซึ่งเป็นการเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบหล่อที่ทำจากทรายหรือทำจากเหล็ก อันเป็นแบบหล่อชั่วคราวหรือถาวร ตามลำดับ แล้วให้อะลูมิเนียมแข็งตัวในแบบเพื่อให้ได้ชิ้นงานเป็นรูปร่างตามแบบหล่อที่ทำขึ้น 2. การหล่ออย่างต่อเนื่อง (Continuous casting, เช่นกรรมวิธี Conventional DC casting) ซึ่งจะได้อลูมิเนียมที่แข็งตัวแล้วเป็นลักษณะของแท่งโลหะ (Ingot) หรือแผ่นโลหะ (Slab) แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปอีกครั้งต่อไป ซึ่งในหัวข้องานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับแท่งโลหะที่ได้จากวิธีการในข้อ 2. คือการหล่ออย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานวัสดุจากอะลูมิเนียมมีอย่างกว้างขวาง กระจายไปอยู่ในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมการขนส่ง อันได้แก่อุตสาหกรรมยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมอากาศยาน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการพัฒนาสมบัติของอะลูมิเนียมในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทาง

กายภาพและสมบัติเชิงกลให้สอดคล้องกับลักษณะการประยุกต์ใช้งานต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยการนำธาตุอื่น ๆ มาผสมรวมกับอะลูมิเนียมให้เกิดเป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียม เช่น การผสมธาตุทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียม และธาตุอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ จึงเป็นที่มาของการกำหนดมาตรฐานชนิดและส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ เพื่อการอ้างอิงให้เป็นสากลและสะดวกต่อการปฏิบัติงาน เช่น รหัสมาตรฐาน 1xxx แสดงถึงโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ไม่มีการผสมธาตุอื่นๆ หรือ 2xxx แสดงถึงโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เป็นต้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการผสมธาตุต่างๆ ในกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลวไม่ใช่เป็นเพียงวิธีการเดียวที่สามารถปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานอะลูมิเนียมได้ เพราะนอกเหนือจากนั้นการปรับแต่งหรือประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ กับเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการหล่อโลหะ เช่นในขั้นตอนระหว่างกระบวนการผลิตได้มีการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว และวิธีการนี้ก็กลายมาเป็นทางเลือกที่จะใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง และเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่กระจ่างมากยิ่งขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบของการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องนั่นเอง จึงทำให้นักวิจัยนี้มีการตั้งวัตถุประสงค์เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลของการศึกษาเกี่ยวกับชิ้นงานที่มาจากแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสม ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือที่จะเรียกโดยย่อว่าวิธีการแบบ DC. กับชิ้นงานที่มาจากแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสม ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Low frequency electromagnetic field) หรือที่จะเรียกโดยย่อว่าวิธีการแบบ LFEC. โดยมุ่งเน้นทำการวิจัยในขอบเขตของพฤติกรรมการณ์แข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่พบว่า ความสำคัญในการพยายามปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงชนิดนี้ ทำให้สามารถผลิตได้ชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมที่มีสมบัติความแข็งแรงสูงมากพิเศษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องนำชิ้นงานนี้ไปใช้งานที่มีข้อจำกัดพิเศษหรือความต้องการเฉพาะอย่างในเกณฑ์คุณภาพที่สูง เช่น การใช้งานเกี่ยวกับอากาศยาน เป็นต้น

เกี่ยวกับการใช้งานด้านอุตสาหกรรมอากาศยานนั้น โลหะหรือวัสดุที่นำมาใช้นั้นต้องมีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม เช่น ความแข็งแรงของวัสดุต้องสูงมากเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงมีการพยายามปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานอะลูมิเนียม ซึ่งวิธีการที่นิยมเลือกปฏิบัติมากที่สุดก็คือการ

พยายามปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยการผสมธาตุต่างๆ ลงไปในกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลว แต่เพราะการผสมธาตุต่างๆ ลงไปหลายชนิดในปริมาณสูงนี้เองที่เป็นสาเหตุ

หลักอันหนึ่งที่ทำให้เกิดรอยร้าวของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผลิตด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่องแบบ DC.

ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมด้วยวิธีอื่นๆ เช่นการนำเทคโนโลยีรูปแบบใหม่ๆ มาปรับเปลี่ยนหรือประยุกต์ใช้กับกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ซึ่งก็คือวิธีการที่เรียกว่า LFEC (low frequency electromagnetic field) หรือการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวในระหว่างที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ซึ่งการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยนำเข้ามาเพิ่มระหว่างกระบวนการหล่อนั้นเป็นวิธีการใหม่อย่างหนึ่งที่ถูกนำมาศึกษา เพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันการเกิดรอยร้าวในแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง โดยวิธีการนี้พบว่าส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในกึ่งกลางกับที่ผิวนอกของน้ำโลหะหลอมเหลวขณะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวมีค่าลดลง แต่กลับเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของธาตุผสมต่างๆ และช่วยลดระดับความลึกของแอ่งกลางน้ำโลหะหลอมเหลวหรือ sump depth ขณะทำการหล่อ จนท้ายที่สุดพบว่า สามารถลดค่าความเค้นตกค้าง และป้องกันการเกิดรอยร้าวภายในของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงได้ อีกทั้งในทางกลับกันยังพบว่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงเพิ่มขึ้น และความต้านทานการแตกร้าวก็เพิ่มขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัวของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า(Low frequency electromagnetic field) หรือที่จะเรียกโดยย่อว่าวิธีการแบบ LFEC.นี้ จากโครงสร้างมหภาคและจุลภาค ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยพื้นฐานหลักในทางโลหะวิทยา

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการแข่งขันตัวของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) กับแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) โดยมุ่งเน้นผลการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการแข่งขันตัวของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) โดยมุ่งเน้นผลการศึกษาเกี่ยวกับเส้นทางการแข็งตัว ตลอดจนชนิด, ลักษณะ และปริมาณการเกิดโครงสร้างยูเทคติกระหว่างแข็งตัว ด้วยการตรวจสอบชิ้นงานจริง กับการคำนวณสมการการแข็งตัวตามทฤษฎีแบบGulliver-Scheil และแบบจำลองการแข็งตัวทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Thermo Calc

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัวของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีและมีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) โดยใช้

1. แท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่นำมาศึกษาจะมีส่วนผสมดังนี้คือ อะลูมิเนียม 85.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโลหะผสมทั้งหมดผสมกับ สังกะสี 9.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโลหะผสมทั้งหมด แมกนีเซียม 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโลหะผสมทั้งหมด และทองแดง 2.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโลหะผสมทั้งหมด ($Al - 9.8Zn - 2.5Mg - 2.3Cu$) โดยนำมาจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันคือ แท่งโลหะที่หนึ่งผลิตด้วยกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง Direct Chilled (Conventional DC. Casting) โดยไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) และแท่งโลหะที่สองผลิตด้วยกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง Direct Chilled (Conventional DC. Casting) โดยมีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC, low frequency electromagnetic field)
2. ศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากข้อ 1. ด้วยการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning electron microscope, SEM.) และเครื่อง Electron probe micro analyzer, EPMA เพื่อการวิเคราะห์ผลในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเกี่ยวกับเรื่องต่างๆ ดังนี้ 1.) ขนาดและการกระจายตัวของเกรน 2.) ชนิดและปริมาณของเฟสหรือโครงสร้างยูเทคติกต่างๆ ในเนื้อโลหะ 3.) นำผลวิเคราะห์จากเครื่อง EPMA ไปศึกษารูปแบบการแข็งตัวจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ในลักษณะของ Solute Redistribution

3. ทำการศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัว โดยการคำนวณจากทฤษฎีโดยอาศัยการอ่านแผนภูมิสมดุลย์ 3 ธาตุ (Ternary phase diagram) ร่วมกับการคำนวณสมการการแข็งตัวแบบ Gulliver-Scheil's equation เพื่อศึกษาเส้นทางการแข็งตัวและลำดับในการแข็งตัวแล้ว เกิดเป็นเฟสหรือโครงสร้างยูเทคติกต่างๆ (Solidification path & sequence)
4. ทำการศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัวจาก แบบจำลองการแข็งตัวทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาเส้นทางการแข็งตัวและลำดับในการแข็งตัวแล้ว เกิดเป็นเฟสหรือโครงสร้างยูเทคติกต่างๆ (Solidification path & sequence) ด้วยโปรแกรม Thermo-calc.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบและเข้าใจถึงพฤติกรรมการแข็งตัวเกี่ยวกับโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เช่นขนาดและการกระจายตัวของเกรน, ชนิดและปริมาณของเฟสหรือ โครงสร้างยูเทคติกต่างๆ ในเนื้อโลหะของแท่งโลหะ อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ($\text{Al} - 9.8\text{Zn} - 2.5\text{Mg} - 2.3\text{Cu}$) ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง Direct Chilled (Conventional DC. Casting) โดยไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) และแท่งโลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง Direct Chilled (Conventional DC. Casting) โดยมีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC, low frequency electromagnetic field)
2. ได้ทราบข้อเปรียบเทียบของพฤติกรรมการแข็งตัวเกี่ยวกับเส้นทางการแข็งตัวและลำดับในการแข็งตัวแล้วเกิดเป็นเฟสหรือ โครงสร้างยูเทคติกต่างๆของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ($\text{Al} - 9.8\text{Zn} - 2.5\text{Mg} - 2.3\text{Cu}$) ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง Direct Chilled (Conventional DC. Casting) โดยมีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC, low frequency electromagnetic field) ที่ได้จากการตรวจสอบจากชิ้นงานจริงกับผลจากการคำนวณจากทฤษฎีโดยอาศัยการอ่านแผนภูมิสมดุลย์ 3 ธาตุ (Ternary phase diagram) ร่วมกับการคำนวณสมการการแข็งตัวแบบ Gulliver-Scheil's equation และจากแบบจำลองการแข็งตัวทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาเส้นทางการแข็งตัวและลำดับในการแข็งตัวแล้วเกิดเป็นเฟสหรือ โครงสร้างยูเทคติกต่างๆ (Solidification path & sequence) ด้วยโปรแกรม Thermo-calc.
3. ได้ทราบผลกระทบของวิธีการผลิตแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ($\text{Al} - 9.8\text{Zn} - 2.5\text{Mg} - 2.3\text{Cu}$) ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง Direct Chilled (Conventional DC. Casting) โดยมีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) ที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวภายในแท่งโลหะหล่อ โดยอธิบายจากประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในข้อ1. และข้อ2.

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ข้อมูลพื้นฐานของโลหะอะลูมิเนียม, โลหะอะลูมิเนียมผสม และโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นในกลุ่ม 7xxx (อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง)

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางแทนเหล็ก และทองแดงได้ในหลายๆ ด้านของงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรม อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่าย มีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูง สามารถหล่อหลอมได้ง่าย^[1] ซึ่งอาจสรุปสมบัติทางกายภาพของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ดังตารางที่ 2.1^[2] แต่ข้อเสียของอะลูมิเนียมมีอยู่บ้างเหมือนกัน โดยเฉพาะอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงไม่สูงมาก มีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic limit) ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก

เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน อันเนื่องมาจากฟิล์มของ Al_2O_3 ที่เกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมกับออกซิเจน และสมบัติที่ขัดตัวได้ง่ายของอะลูมิเนียมจึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยการรีดเป็นแผ่น หรืออัดขึ้นรูปได้สะดวก ทำให้การใช้งานมีขอบเขตกว้างขวางมาก แต่บางครั้งก็มีการดัดแปลงธาตุอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติในด้านต่างๆ เช่น การเติมซิลิกอน ทองแดง เพื่อให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นแต่ความเหนียวจะลดลง

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

น้ำหนักอะตอม	26.97 g/mole
ระบบผลึก	FCC
ความหนาแน่น	2.70 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	658 °C
ความร้อนจำเพาะ (0-100 °C)	0.2259 Cal/g. °C
ความร้อนแฝงการหลอมเหลว	93 Cal/g
อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว	6.6 %
ความต้านทานจำเพาะ	2.699 μΩ.cm.
สภาพนำความร้อน	0.52 Cal.cm/cm °C.sec

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ความต้านแรงดึง (Tensile Strength)	8 – 10 kg/mm ²
ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit)	3 kg/mm ²
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation)	40 – 50 %
ความแข็ง (Hardness)	16 – 20 HB
มอดุลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elastic)	7800 kg/mm ²

โลหะอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่นๆ ได้หลายชนิด ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน โลหะผสมอะลูมิเนียมจำแนกออกได้เป็น สองประเภทที่สำคัญคือ

1. โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought alloy)
2. โลหะผสมประเภทหล่อหลอม (Cast alloy)

โดยโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นนั้น มีหลายชนิดแตกต่างกันตามธาตุที่ใช้ผสมอยู่ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งแต่ละประเภทจะให้สมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันด้วย แล้วแต่เลือกนำไปใช้งานตามความเหมาะสม

ตารางที่ 2.3 รหัสธาตุผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็น

1xxx	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (pure Al)
2xxx	อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al – Cu)
3xxx	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (Al – Si, Al – Si – (Mg, Cu))
4xxx	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (binary Al – Si)
5xxx	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Al – Mg)
6xxx	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Al – Mg-Si)
7xxx	อะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Al – Zn, Al – Zn – (Mg, Cu))
8xxx	อะลูมิเนียมผสมดื่บุก
9xxx	อะลูมิเนียมผสมธาตุอื่นๆที่จะมีใช้งานในอนาคต

ตัวอย่างอิทธิพลของธาตุผสมต่อสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสม^[3] เช่น

ทองแดง (Cu) เป็นธาตุที่นิยมผสมในปริมาณ 4 – 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมีผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง แต่จะลดความต้านทานในการต้านทานการกัดกร่อน และ hot tear รวมถึงความสามารถในการหล่อหลอม

แมกนีเซียม (Mg) วัตถุประสงค์หลักของการผสมทองแดง คือ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง เพราะจะทำให้เกิดเฟสที่แข็ง และจัดการเกิดเฟสที่อ่อนตัว แต่ความต้านทานการกัดกร่อนจะไม่ลดลงด้วยอิทธิพลของแมกนีเซียม

ซิลิกอน (Si) อิทธิพลที่เด่นชัดคือการเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อหลอม เพิ่มความสามารถการไหลตัว เพิ่มความต้านทานของการเกิด hot tear ลดอัตราการเย็นตัว และเพิ่มเปอร์เซ็นต์ การแข็งตัวในบริเวณยูเทคติก

สังกะสี (Zn) ไม่มีคุณสมบัติในทางคืออย่างเด่นชัดในด้านสมบัติทางกล แต่ช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการทางความร้อนต่างๆ

ดีบุก (Tin) เพิ่มความแข็งแรงจากกระบวนการ Precipitation hardening และเพิ่มความสามารถในการกลึงไส เป็นต้น

นอกเหนือจากการเติมธาตุผสมอื่นๆ แล้ว การปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสมยังสามารถทำได้ในขั้นตอนอื่นๆอีก เช่น ภายหลังกระบวนการผลิตที่ได้ชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมมาแล้ว จึงนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) หรือในขั้นตอนระหว่างกระบวนการผลิต เช่นการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้เอง คือที่มาของเรื่องที่จะนำมาทำการวิจัย โดยรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้นี้จะแสดงไว้ในหัวข้อ 2.1 ที่เป็นวรรณกรรมปริทัศน์เกี่ยวกับแนวคิดและการพัฒนากระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ

ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วเกี่ยวกับความหลากหลายของอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่มีหลายชนิดแตกต่างกันตามธาตุที่ใช้ผสมแล้วแต่เลือกนำไปใช้งาน แต่ในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่มุ่งเน้นการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการขนส่งเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอากาศยาน ^[4, 12] เป็นต้น ซึ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมการขนส่งดังกล่าวนี้มีการนำโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นมาใช้ผลิตเป็นโครงสร้าง และชิ้นส่วนหรืออะไหล่เหล่านั้นเอง เช่นตัวถัง ปีก ใบพัด เป็นต้นโดยที่โลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่ถูกเลือกมาใช้ในงานในอุตสาหกรรมการขนส่งนี้คือกลุ่มที่มีธาตุผสมหลักเป็นธาตุสังกะสี (Zn) หรือมีรหัสแสดงกลุ่มคือ 7xxx ซึ่งมีสมบัติทางกลและตัวอย่างความเหมาะสมในการเลือกใช้งานตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ส่วนชนิดและปริมาณธาตุผสมที่นิยมใช้กับโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่ถูกเลือกมาใช้งานของกลุ่มคือ 7xxx จะแตกต่างกันหลายแบบและจะมีรหัสระบุชนิดตลอดจนแสดงถึงปริมาณธาตุผสมที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลและลักษณะการใช้งานของโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx ที่
นิยมอยู่ในปัจจุบัน

รหัส	ส่วนผสม	สมบัติทางกลในค่าสูงสุด			การใช้งาน
		Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	
7005	4.6Zn-1.4 Mg – 0.5Mn-0.1Cr – 0.1Zr– 0.03Ti	641	483	16	ขอบรางรถไฟ , อุปกรณ์ยึด มุม ,ตู้คอนเทนเนอร์ ,ไม้ เทนนิส ,ไม้เบสบอล
7039	4 Zn-2.8 Mg – 0.2Mn-0.2 Cr	450	400	12	ถังบรรจุสารเคมีประเภท สารอินทรีย์,ถังบรรจุอัด ความดัน , อุปกรณ์รัดถัง โครงสร้างจรวดมิสไซล์
7049	7.6 Zn-2.5Mg- 1.5Cu-0.15 Cr	538	490	7	โครงสร้างเครื่องบิน, โครงสร้างจรวดมิสไซล์ , เกียร์ใช้ในการลงจอด
7050	6.2 Zn-2.3Mg – 2.3Cu- 0.12Zr	510	496	12	โครงสร้างเครื่องบินที่ผ่าน การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) หรือการ Forgings
7072	1.0 Zn	148	83	20	Fin stock
7075	5.6 Zn-2.5Mg – 1.6Cu -0.23 Cr	703	634	9	โครงสร้างเครื่องบิน
7076	7.5 Zn-1.6Mg – 0.55Mn-0.65 Cu	485	415	14	ใบพัดเครื่องบิน
7175	5.6 Zn-2.5Mg – 1.6Cu-0.23 Cr	593	524	11	โครงสร้างเครื่องบิน
7178	6.8 Zn-2.7Mg – 2.0Cu -0.3 Cr	440	420	15	โครงสร้างและในส่วนของ เครื่องบินหรือยานอวกาศ
7475	5.7 Zn-2.3Mg- 1.5Cu-0.22 Cr	683	600	10	ลำตัวเครื่อง, ปีกและผนัง เครื่องบิน

ตารางที่ 2.5 ปริมาณธาตุผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx ที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน

รหัส อะลูมิเนียม ผสม ประเภทขึ้น รูปเย็น	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (ร้อยละของน้ำหนักผสม)						
	ซิลิกอน (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
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

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

รหัส อลูมิเนียม ผสมประเภท ขึ้นรูปเย็น	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (ร้อยละของน้ำหนักผสม)						
	ซิลิกอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
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
7129	0.15	0.3	0.5-0.9	0.10	1.3-2.0	0.10	4.2-5.2
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 2.5 (ต่อ)

รหัส อคูมินิยม ผสมประเภท ขึ้นรูปเย็น	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (ร้อยละของน้ำหนักผสม)						
	ซิลิกอน (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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 วรรณกรรมปริทรรศน์

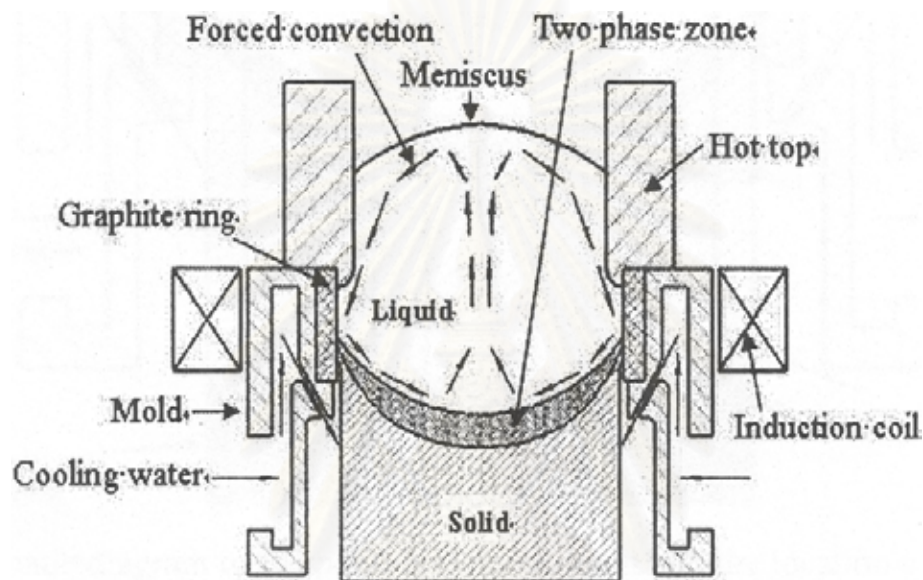
เกี่ยวกับแนวคิดและการพัฒนากระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้การ
ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

(Low frequency electromagnetic field) หรือ LFEC.

ในการใช้งานด้านอุตสาหกรรมการขนส่ง เช่นอุตสาหกรรมยานยนต์ และ อุตสาหกรรมอากาศยาน นั้น โลหะหรือวัสดุที่นำมาใช้นั้นต้องมีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม เช่น ความแข็งแรงของวัสดุต้องสูงมากเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงมีการพยายามปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงาน อะลูมิเนียม ซึ่งวิธีการที่นิยมเลือกปฏิบัติมากที่สุดก็คือการพยายามปรับปรุงสมบัติทางกลของ ชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยการผสมธาตุต่างๆ ลงไปในกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลว โดยที่โลหะ อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่ถูกเลือกมาใช้งานในอุตสาหกรรมการขนส่งนี้ คือกลุ่มที่มีธาตุ ผสมหลักเป็นธาตุสังกะสี (Zn) หรือมีรหัสแสดงกลุ่มคือ 7xxx เพราะต้องการอาศัยประโยชน์ของ ธาตุสังกะสี (Zn) ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยวิธีการทางความร้อน ต่างๆ (Heat Treatment) แต่ธาตุสังกะสี (Zn) เองไม่ได้มีประโยชน์ช่วยโดยตรงอย่างเด่นชัดใน ด้านสมบัติทางกล ทำให้ต้องอาศัยการเติมธาตุชนิดอื่นๆลงไปในกระบวนการหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสม อีกด้วย และเพราะการผสมธาตุต่างๆ ลงไปหลายชนิดในปริมาณสูงนี้เองที่เป็นสาเหตุหลักอันหนึ่งที่ ทำให้เกิดรอยร้าวของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผลิตด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่องแบบDC.^[13]

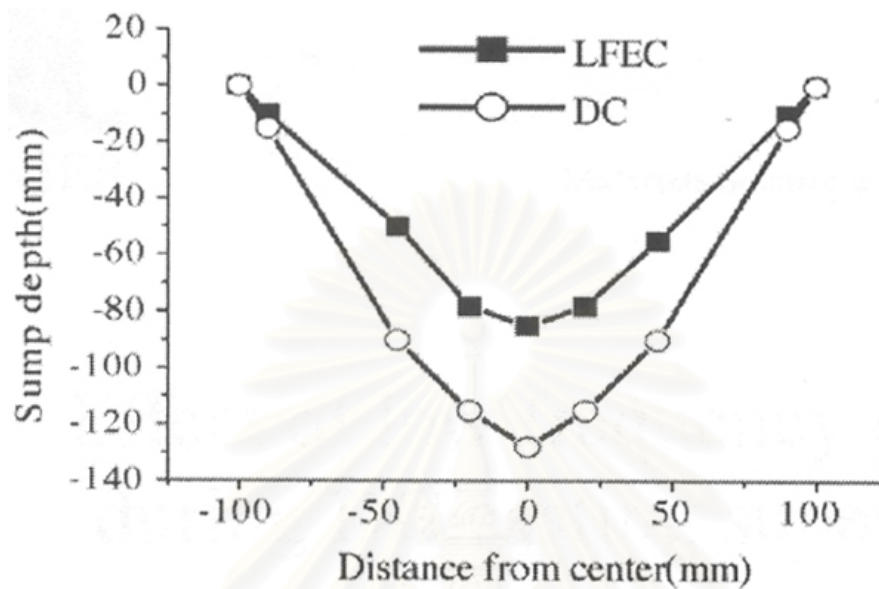
ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมด้วยวิธี อื่นๆ เช่นการนำเทคโนโลยีรูปแบบใหม่ๆมาปรับเปลี่ยนหรือ ประยุกต์ใช้กับกระบวนการหล่ออย่าง ต่อเนื่องดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วซึ่งก็คือวิธีการที่เรียกว่า LFEC. (low frequency electromagnetic field) หรือการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้าง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวในระหว่างที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวใน กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ซึ่งการ ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยนำเข้ามาเพิ่มระหว่างกระบวนการหล่อดังที่แสดงในภาพที่ 2.1 นั้น เป็นวิธีการใหม่อย่างหนึ่งที่ถูกนำมาศึกษาผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของแท่งโลหะหล่ออย่าง ต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงบ้างแล้วในเบื้องต้นโดยนักวิจัยชาวจีน และ ญี่ปุ่น เพื่อวัตถุประสงค์ในการหาวิธีที่จะป้องกันการเกิดรอยร้าวในแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง และทำให้สามารถผลิตแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสม สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุสูงมากเป็นพิเศษ โดยวิธีการหล่ออย่าง

ต่อเนื่องได้ ซึ่งแต่เดิมนั้นข้อจำกัดของการผลิตด้วยการหล่ออย่างต่อเนื่อง ก็คือขนาดของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมนั่นเอง เพราะถ้าต้องการหล่อแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุสูงมากเป็นพิเศษ โดยมีขนาดแท่งโลหะใหญ่มาก (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 150 มิลลิเมตร) ก็จะไม่สามารถหล่อได้เพราะจะเกิดรอยร้าวนั่นเอง



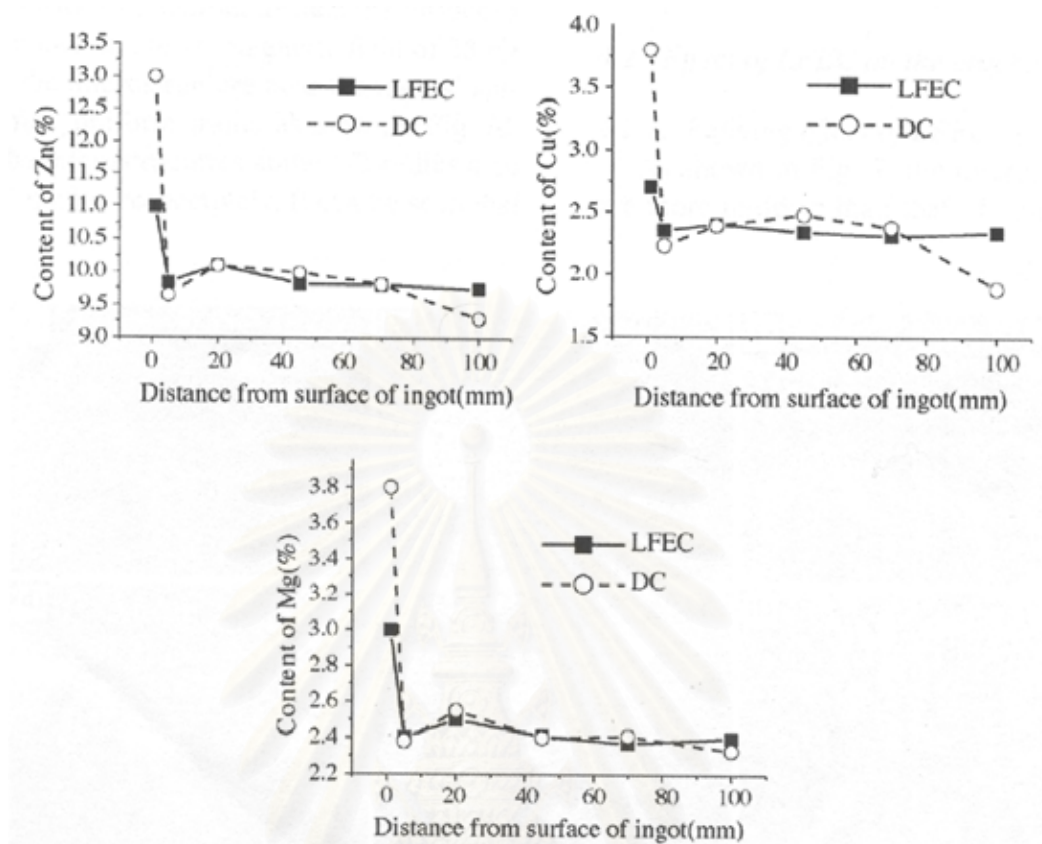
ภาพที่ 2.1 กระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่องแบบ Direct Chilled (conventional DC Casting) และมีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว

โดยวิธีการผลิตแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุต้องสูงมากเป็นพิเศษ จากการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวในระหว่างที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC Casting) นี้ ในเบื้องต้นได้มีการอธิบายผลการศึกษาโดยกลุ่มนักวิจัยชาวจีน และญี่ปุ่น^[5] เกี่ยวกับการที่ค้นพบว่าการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตหรือวิธีการที่เรียกว่า LFEC. จะส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในกึ่งกลางกับที่ผิวนอกของน้ำโลหะหลอมเหลวขณะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวมีค่าลดลง และลดระดับของ sump depth ของน้ำโลหะหลอมเหลวขณะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว ดังที่แสดงในภาพที่ 2.2



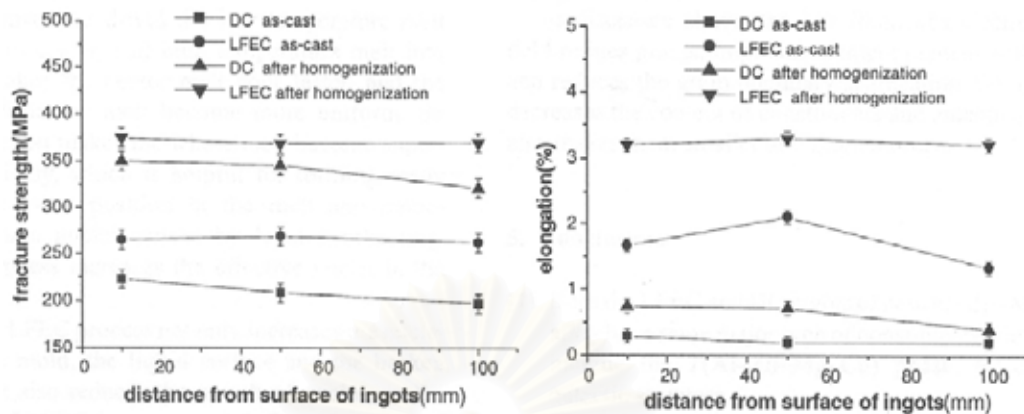
ภาพที่ 2.2 การเปรียบเทียบ Sump depth ระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.

แต่กลับเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของธาตุผสมต่างๆ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 จนท้ายที่สุดได้มีการอธิบายว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่ส่งผลให้ สามารถลดค่าความเค้นตกค้าง อีกทั้งยังพบว่ามีผลกระทบต่อเนื่องถึงสมบัติทางกลของเนื้อวัสดุของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่มีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย ดังที่แสดงในภาพที่ 2.4 กับตารางที่ 2.6 และส่งผลดีต่อการป้องกันการเกิดรอยร้าวภายในของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงได้ ซึ่งแสดงว่าความต้านทานการแตกร้าวก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังที่แสดงในภาพที่ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดกับแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่หล่อแบบต่อเนื่องแบบ Direct Chilled (conventional DC. Casting) แต่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว



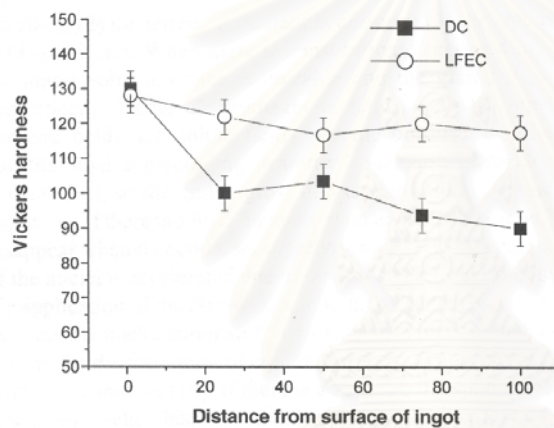
ภาพที่ 2.3 การกระจายตัวของธาตุผสมในแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง เปรียบเทียบกันระหว่างที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



180

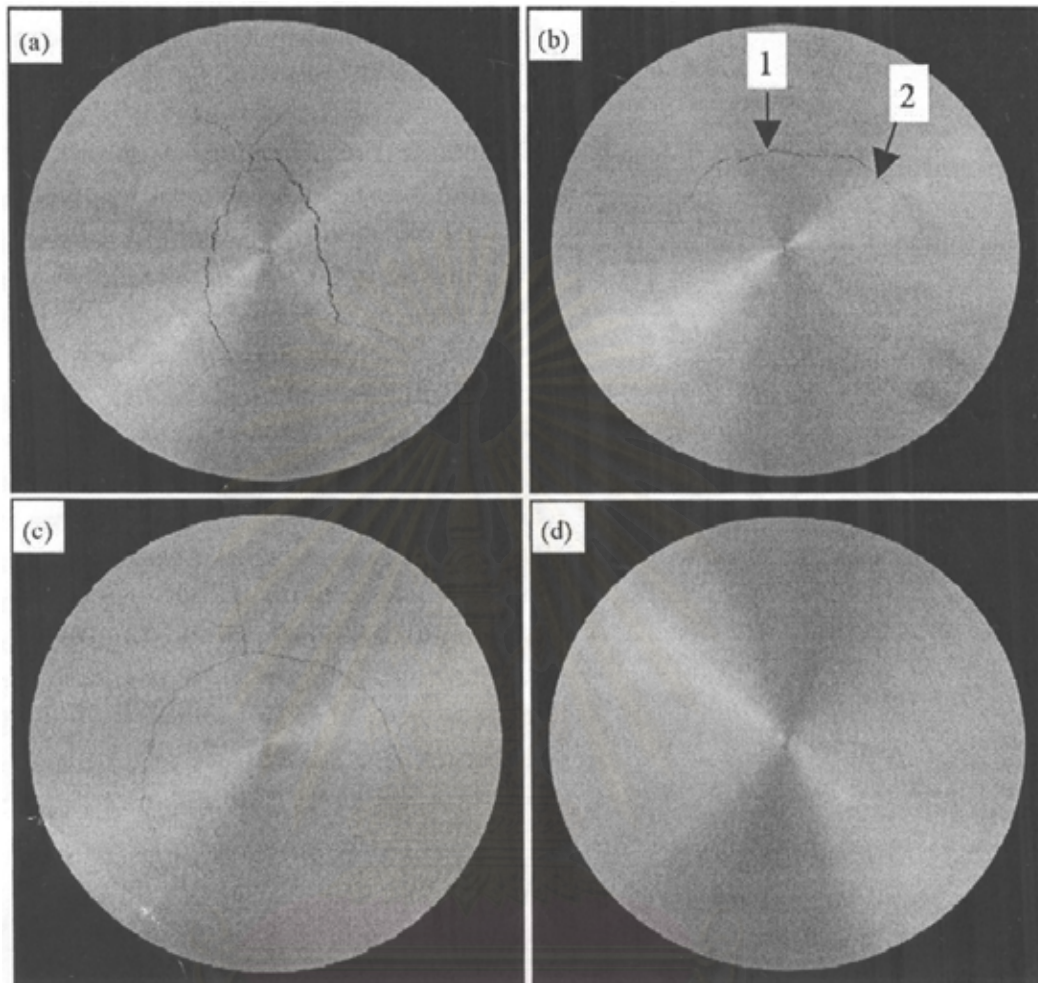
Y. Zuo et al. / Materials Science and



ภาพที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื้ออะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกลเปรียบเทียบระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื้ออะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.

	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
DC	213 MPa	0.2 %
LFEC	265 MPa	1.67 %



ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบการเกิดรอยร้าวภายในแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. (ภาพ a, b, c พบรอยแตกร้าว โดยตัวเลข 1, 2 ในภาพ b ชี้ระบุตำแหน่งแนวรอยแตกร้าว) กับ LFEC. (ภาพ d ไม่เกิดรอยแตกร้าว)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับรูปแบบและสมการการแข็งตัว

การศึกษาเพื่อที่จะให้เข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรม การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวใดๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหลอมเหลวที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วยนั้น ยิ่งทำให้การศึกษารูปแบบการแข็งตัวจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกันเช่น ส่วนผสมทางเคมีเริ่มต้น, อัตราการเย็นตัว, เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว, อัตราการโตของdendrite, สัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้วที่อุณหภูมิใดๆ และการเกิดการแพร่ระหว่างการแข็งตัว เป็นต้น ซึ่งจะพบว่าการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจึงเป็นเรื่องที่ยาก

อย่างไรก็ดีเพื่อที่จะใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวนั้นมาช่วยทำความเข้าใจและ ใช้อธิบายเรื่องราวในการทำวิจัยครั้งนี้ที่เกี่ยวกับการพิจารณาการแข็งตัวโดยคำนึงถึง Solute Redistribution จึงได้สรุปแนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับรูปแบบและสมการการแข็งตัวแบ่งตามแบบจำลองดังนี้^[10, 14, 16]

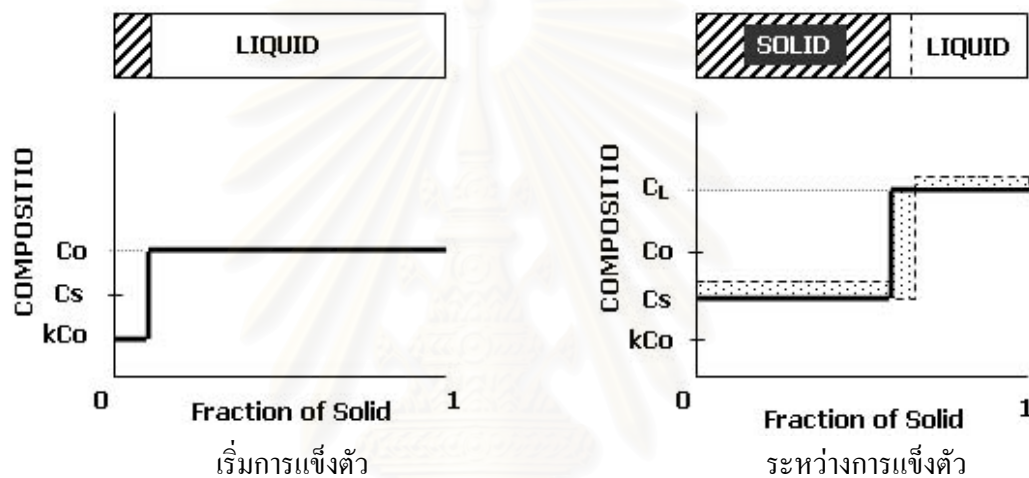
1. รูปแบบ Equilibrium Solidification ที่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวกับบางส่วนที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากการแพร่ที่เกิดขึ้นทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้เร็วเพียงพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือเวลาในการแข็งตัวมีมากพอให้การแพร่ทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในกรณีนี้จะไม่เกิดโครงสร้างที่ต่างจากที่ควรจะปรากฏในแผนภูมิสมดุลและไม่เกิด Micro Segregation นั่นเอง ด้วยเหตุนี้การแข็งตัวในรูปแบบจำลองนี้จึงเป็นไปตามแผนภูมิสมดุล และสามารถคำนวณความสัมพันธ์ของส่วนผสมต่างๆ ได้จาก Lever Rule
2. รูปแบบของ Gulliver-Scheil มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลว และในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มีการแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย แต่ระหว่างการแข็งตัวจะสมมติให้เกิดสภาวะสมดุลที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวไว้เสมอ ดังนั้นส่วนที่แข็งตัวก่อนและหลังจะมีความเข้มข้นของธาตุผสมต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้อาจจะเกิดโครงสร้างที่ต่างจากที่ควรจะปรากฏในแผนภูมิสมดุลและเกิด Micro Segregation ได้

3. รูปแบบของ Clyne & Kurz มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวแต่ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุผสมที่เกิดจากการแพร่ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่เห็นความแตกต่างชัดเจน แต่อัตราการแพร่ถือว่ายังเกิดช้าอยู่ ซึ่งอาจโครงสร้างที่ต่างจากที่ควรจะปรากฏในแผนภูมิสมดุลหรือที่เรียกว่าการเกิด Micro Segregation นั้นเอง แต่จะไม่รุนแรงเท่ากับที่เกิดในแบบจำลองของ Gulliver-Scheil
4. รูปแบบของ Umeda, Kurz & Himemiya ไม่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวและ ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มีการแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย
5. รูปแบบของ Umeda & Himemiya, Nastac & Stefanescu ไม่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวและ ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีการแพร่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุผสมอยู่ตลอดเวลาในระหว่างการแข็งตัว

ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะรูปแบบจำลองการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว 3 รูปแบบแรกคือ รูปแบบของ Equilibrium Solidification, รูปแบบของ Gulliver-Scheil และรูปแบบของ Clyne & Kurz ซึ่งมีสมมติฐานและการคำนวณด้วยสมการดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. รูปแบบของ Equilibrium Solidification ที่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวกับบางส่วนที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากการแพร่ที่เกิดขึ้นทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้เร็วเพียงพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือเวลาในการแข็งตัวมีมากพอให้การแพร่ทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังแผนภาพข้างล่างนี้



ภาพที่ 2.6 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Equilibrium Solidification

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) สำหรับรูปแบบของ Equilibrium Solidification จะมีขั้นตอนดังนี้ คือเริ่มที่สมการแสดงความสมดุลของมวลสาร โดยมวลสารที่แพร่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็งจะเท่ากับผลรวมของมวลสารที่แพร่ภายในส่วนที่เป็นของเหลว และมวลสารที่แพร่ภายในส่วนของแข็ง

$$C_s f_s + C_L f_L = C_o \quad (2.1)$$

โดยปรับรูปสมการโดยใช้นิยามของสัดส่วนปริมาณโลหะที่แข็งตัวแล้ว f_s และ k , อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุล

$$f_s = \frac{C_L^* - C_O}{C_L^* - C_S^*} \quad (2.2)$$

$$k = \frac{C_s^*}{C_L^*} \quad (2.3)$$

ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) คือ

$$C_s = kC_o / [1 + (k - 1) f_s] \quad (2.4)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว

C_s, C_L คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวตามลำดับ

f_s, f_L คือ สัดส่วนปริมาณโลหะที่แข็งตัวแล้ว และสัดส่วนปริมาณที่หลอมเหลวยู่ตามลำดับ

C_s^*, C_L^* คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวบริเวณผิว

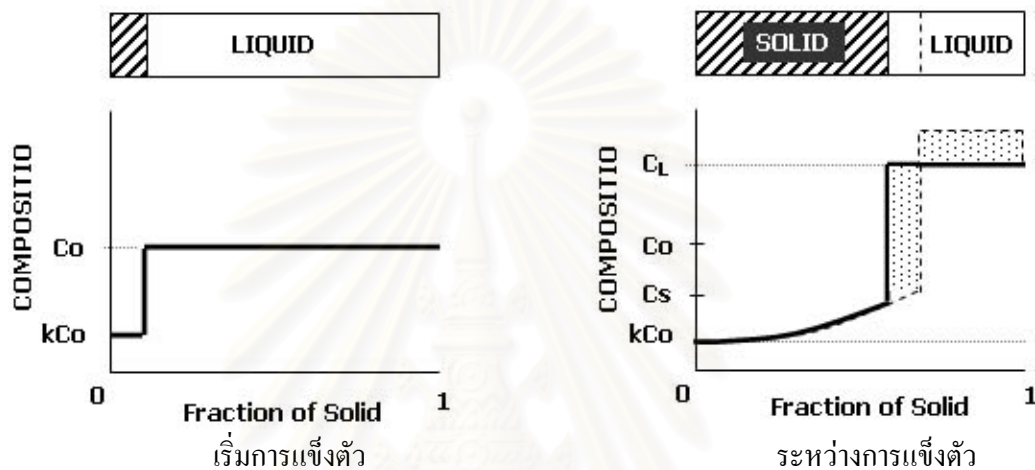
รอยต่อตามลำดับ

k คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุล

ณ. บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. รูปแบบของ Gulliver-Scheil มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลว และในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มี การแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย แต่ระหว่างการแข็งตัว จะสมมติให้เกิดสภาวะสมดุลที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวไว้เสมอ ดังนั้นส่วนที่แข็งตัว ก่อนและหลังจะมีความเข้มข้นของธาตุผสมต่างกัน ดังแผนภาพข้างล่างนี้



ภาพที่ 2.7 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Gulliver-Scheil

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) สำหรับรูปแบบของ Gulliver-Scheil จะมีขั้นตอนดังนี้
 คือเริ่มที่สมการแสดงความสมดุลของมวลสาร โดยมวลสารที่แพร่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็งจะเท่ากับ มวลสารเฉพาะที่แพร่ภายในส่วนที่เป็นของเหลวเท่านั้น
 เนื่องจากจะไม่มี การแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลยในส่วนของแข็ง

$$(C_L^* - C_S^*)df_s = (1 - f_s)dC_L^* \quad (2.5)$$

ปรับรูปสมการเพื่อใช้ในการปฏิยานุพันธ์

$$\frac{dC_L^*}{(C_L^* - C_S^*)} = \frac{df_s}{(1 - f_s)} \quad (2.6)$$

ปรับรูปสมการโดยใช้นิยามของ k , อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุลตามสมการ 2.3

$$k = \frac{C_s^*}{C_L^*}$$

และทำการปฏิยานุพัทธ์สมการดังนี้

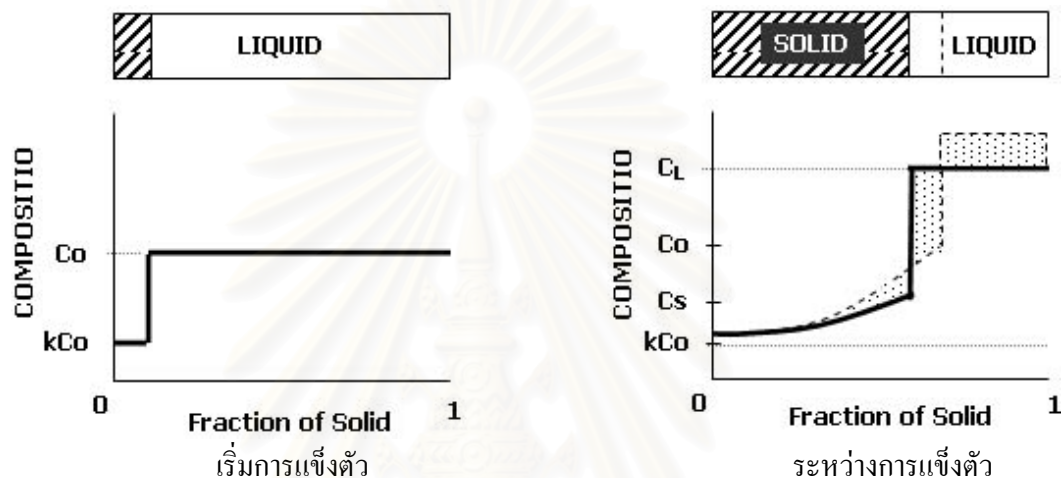
$$\frac{1}{k} \int_{C_o}^{C_s} \frac{dC_s^*}{C_s^*} = \int_0^{f_s} \frac{df_s}{(1 - f_s)} \quad (2.7)$$

ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) ดังนี้

$$C_s^* = kC_o[1 - f_s]^{k-1} \quad (2.8)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานของพฤติกรรมกาาแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวเป็นรูปแบบและสมการการแข็งตัวแบบของ Gulliver-Scheil ที่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลว และในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มีการแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย แต่ระหว่างการแข็งตัวจะสมมติให้เกิดสถานะสมดุลที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวไว้เสมอ ดังนั้นส่วนที่แข็งตัวก่อนและหลังจะมีความเข้มข้นของธาตุผสมต่างกัน ซึ่งแบบจำลองการแข็งตัวในรูปแบบและสมการการแข็งตัวของ Gulliver-Scheil เป็นการคำนวณวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (f_s) กับอุณหภูมิ (T) หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับอุณหภูมิ (T) ที่ไม่ได้ใช้สมการที่ซับซ้อน เนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงอิทธิพลของสัมประสิทธิ์การแพร่ เพียงแต่คำนวณหาความเข้มข้นในส่วนที่แข็งตัวแล้ว และสามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมกาาแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวในงานวิจัยนี้ได้เหมาะสมและเข้าใจง่าย

3. รูปแบบของ Clyne & Kurz มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวแต่ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุผสมที่เกิดจากการแพร่ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่เห็นความแตกต่างชัดเจน แต่อัตราการแพร่ถือว่ายังเกิดขึ้นอยู่ ดังแผนภาพข้างล่างนี้



ภาพที่ 2.8 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Clyne & Kurz

ดังนั้นสมการในการแข็งตัวจึงต้องคำนึงถึง ปฏิกิริยาการแพร่ที่เป็นผลมาจากอิทธิพลของการแพร่ที่เกิดขึ้นในส่วนที่เป็นของแข็ง ซึ่งการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) สำหรับรูปแบบของ Clyne & Kurz จะมีขั้นตอนที่เริ่มต้นจากสมการแสดงความสมดุลของมวลสาร โดยมวลสารที่แพร่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็ง จะเท่ากับผลรวมของมวลสารที่แพร่ภายในส่วนที่เป็นของเหลวและมวลสารที่แพร่ภายในส่วนของแข็ง โดยจะใช้ค่า α หรือเวลาในการแข็งตัวแบบไร้หน่วย มาใช้ในการคำนวณร่วมกับสมการ 2.8 ซึ่งจะได้สมการสำหรับคำนวณการแข็งตัวเป็น

$$C_s^* = kC_o \left[1 - (1 - 2\alpha k) f_s \right]^{\frac{k-1}{1-2\alpha k}} \quad (2.9)$$

ซึ่งค่า α หรือเวลาในการแข็งตัวแบบไร้หน่วยนั้นสามารถคำนวณหาโดยคำนวณผ่านสมการการแพร่ และพิจารณาถึงอิทธิพลของสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ค่าต่างๆกันจากสมการ

$$D_s = D_o \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.10)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

D_s คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ชนิด self-diffusion coefficient หน่วยเป็น m^2/s

D_o คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เรียกว่า frequency factor หน่วยเป็น m^2/s

Q คือ พลังงานในการแพร่ หน่วยเป็น J

R คือ ค่าคงที่ 8.314 หน่วยเป็น J/K

T คือ อุณหภูมิ หน่วยเป็น K

ซึ่งสามารถหาค่า D_o จากตารางที่ 2.7 ได้

เมื่อได้ค่า D_s จากสมการ 2.10 จึงนำไปคำนวณต่อเป็นค่า α จากสมการ

$$\alpha = \frac{D_s \cdot t_f}{L^2} \quad (2.11)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

t_f คือ เวลาในการแข็งตัว หน่วยเป็น s

L คือ ระยะความกว้างครึ่งหนึ่งของขนาด dendrite หน่วยเป็น m

นั้นแสดงว่าจากสมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ที่ 2.9 ก็สามารถพิจารณาเป็นสมการการแข็งตัวของ Gulliver-Scheil ได้เมื่อไม่คำนึงถึงการแพร่ที่เกิดขึ้นส่วนที่เป็นของแข็ง โดยจะใช้ค่า α เป็น 0 นั้นเอง แต่ในบางครั้งของรูปแบบการแข็งตัวแบบที่มีการแพร่เกิดขึ้นส่วนที่เป็นของแข็ง นั้น อาจมีบางครั้งที่ปัจจัยของปรากฏการณ์การแข็งตัวและการแพร่ส่งผลให้ค่า α มีค่ามาก (สูงเกิน 50) ซึ่งในกรณีนี้ สมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ที่ 2.9 จะไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณโดยใช้ค่า α ด้วยเหตุนี้ สมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz จึงจำเป็นต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้เวลาในการแข็งตัวแบบไร้หน่วย เป็นค่า Ω และจะหาค่า Ω จากสมการ

$$\Omega = \alpha \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha}\right) \right] - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2\alpha}\right) \quad (2.12)$$

จึงทำให้ได้สมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ใหม่ที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ดังนี้

$$C_s^* = [1 - (1 - 2\Omega k) f_s]^{\frac{k-1}{1-2\Omega k}} \quad (2.13)$$

และนำมาพิจารณาร่วมกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับอุณหภูมิ (T) ใดๆ ที่เป็นไปตามสมการ

$$\frac{C_s}{kC_o} = \frac{T_m - T}{T_m - T_L} \quad (2.14)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

T คือ อุณหภูมิ หน่วยเป็น K

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลว หน่วยเป็น K

T_L คือ อุณหภูมิของเหลวที่ความเข้มข้นเริ่มแรก หน่วยเป็น K

เมื่อพิจารณาสมการ 2.9 ร่วมกับสมการ 2.13 จะได้สมการ

$$\frac{C_s}{kC_o} = [1 - (1 - 2\Omega k) f_s]^{\frac{k-1}{1-2\Omega k}} \quad (2.15)$$

สุดท้ายเมื่อสร้างความสัมพันธ์ใหม่จากสมการ 2.14 กับสมการ 2.15 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (fs) กับอุณหภูมิ (T) ของสมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ดังนี้

$$f_s = \frac{1 - [(T_m - T)/(T_m - T_L)]^{\frac{k-1}{1-2\Omega k_o}}}{1 - 2\Omega k} \quad (2.16)$$

ตารางที่ 2.7 ค่า D_0 และ Q ที่มีอิทธิพลมาจากธาตุผสมต่างๆ สำหรับหาค่า D_s ในโลหะผสม อะลูมิเนียม

Alloy	D_0 (m^2/s)	Q (kJ/mol)
Cu	1.3×10^{-4}	138
Ag	2.0×10^{-4}	140
Au	2.2×10^{-4}	134
Li	4.5×10^{-4}	139
Mg	6.23×10^{-6}	115
Zn	1.77×10^{-5}	117
Si	2.02×10^{-4}	136
Cr	1.84×10^{-1}	253
Mn	1.04×10^{-2}	211
Fe	9.1×10	258
Zr	7.28×10^{-2}	242

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ชิ้นงานที่นำมาศึกษาเป็นชิ้นงานที่ตัดมาจากแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องจากเตาหลอมแบบใช้ขดลวดเหนี่ยวนำให้ความร้อนชนิดความถี่ปานกลาง 500 กิโลวัตต์ ความถี่เตาไฟฟ้า 25 Hz, กระแสไฟ 120 A, หลอมที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส แล้วทำการขจัด Gas และ Slag แล้วจึงทำการเติมธาตุผสมให้ได้ส่วนผสมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมหลอมเหลวตามตารางที่ 3.1 ทำการหล่อด้วยอัตราเร็ว 80 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้สุดท้ายได้แท่งโลหะทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 ด้านล่าง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีในน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมหลอมเหลว (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักโลหะผสมทั้งหมด)

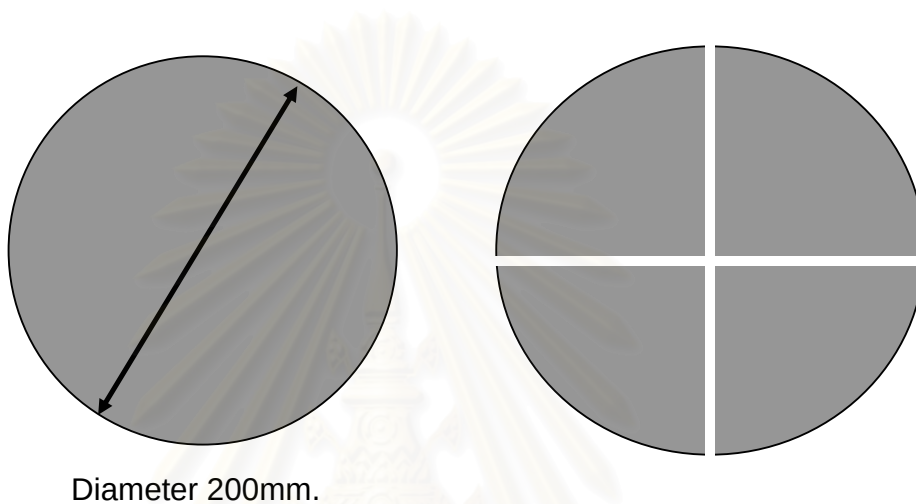
Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Si
9.8	2.5	2.2	0.13	0.12	0.08

3.1.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)^[7]

- นำชิ้นงานมาตัดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน ดังภาพที่ 3.1
- นำส่วนหนึ่งไปทำการเตรียมผิวด้านบนด้วยการมิลลิ่ง (Milling) ในระดับความละเอียดสูงสุด ($\nabla\nabla\nabla$, สัญลักษณ์ความละเอียดของการกลึงในระดับ 3 ใบมีด)
- เตรียมสารเคมีสำหรับกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้าง (Etching) ด้วยส่วนผสมดังนี้ ชนิด (1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร (10 g NaOH + 90 ml Water) ชนิด (2) กรดไนตริกเข้มข้น 50% โดยปริมาตร (50% HNO₃ acid)
- นำชิ้นงานที่เตรียมผิวไว้มากัดผิวด้วยสารเคมีชนิด (1) โดยอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 นาที แล้วนำออกมาล้างด้วยน้ำจืดเป่าให้แห้งก่อน

หลังจากนั้นนำผิวหน้าดังกล่าวไปกัดผิวด้วยสารเคมีชนิด (2) เป็นเวลา 2-3 วินาที ดังภาพที่ 3.2 แล้วนำออกมาล้างด้วยน้ำแล้วจึงเป่าให้แห้ง ก็จะได้โครงสร้างมหภาคปรากฏ

5. ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องถ่ายภาพเพื่อเก็บไว้ตรวจสอบผล



ภาพที่3.1 การตัดแบ่งชิ้นงาน



ภาพที่3.2 การทำปฏิกิริยาของชิ้นงาน ($\text{Al} - 9.8\text{Zn} - 2.5\text{Mg} - 2.3\text{Cu}$) กับกรดไฮโดรอกไซด์ผสมกับน้ำกลั่นกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส

3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

1. นำชิ้นงานที่ตัดแล้ว 1 ส่วนจากข้อ 3.1.1. มาตัดเป็น 3 ส่วนไล่ลำดับจากกึ่งกลางชิ้นงานจนมาถึงขอบชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.3
2. นำชิ้นงานที่ตัดแล้วแต่ละส่วนไปตัดย่อยให้ได้ขนาดลูกบาศก์ $14 \times 14 \times 14 \text{ mm}^3$
3. ทำการหล่อแบบสำหรับทำเรือนชิ้นงาน (Mounting) ด้วยวิธีการแบบร้อน (Hot mounting) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ภายใต้ความดันสุญญากาศ 21 MPa และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแบบยึดชิ้นงาน 20 มิลลิเมตร
4. นำชิ้นงานที่หล่อแบบยึดแล้วไปจัดเตรียมผิวด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 1,000, 1,500 และ 2,400 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำไปขัดละเอียดด้วยผงขัดเพชรขนาด 3 ไมครอน และ 0.25 ไมครอน ตามลำดับ
5. เตรียมสารเคมีสำหรับกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้างด้วยส่วนผสมดังนี้ กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 40% โดยปริมาตรจำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50% โดยปริมาตรจำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 30% โดยปริมาตรจำนวน 25 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ($10 \text{ ml HF} + 15 \text{ ml HCl} + 25 \text{ ml HNO}_3 + \text{Water}$)
1. นำสารเคมีในข้อ 5. ไปเจือจางให้ความเข้มข้นลดลง 10 เท่า ด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำมากัดผิวหน้าชิ้นงานเป็นเวลา 1-2 วินาที จึงล้างด้วยน้ำเปล่าให้แห้ง แล้วนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค ต่อไป



ภาพที่ 3.3 การตัดแบ่งชิ้นงานจากกลางไปถึงผิวชิ้นงาน (จากขวามาซ้ายตามลำดับ)

3.1.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบเกรนในโครงสร้างจุลภาค

เนื่องจากการใช้สารเคมีในข้อ 3.1.2 สำหรับกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้างนั้นสามารถทำให้เห็นโครงสร้างยูเทคติกได้ แต่ในบางบริเวณไม่สามารถทำให้ขอบเกรนปรากฏได้ชัดเจน ทำให้ยากต่อการคำนวณวิเคราะห์หาขนาดเกรนจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนมาใช้สารเคมีชนิดใหม่นั้นก็คือ กรดไฮโดรฟลูออบอริก (HBF_4) ซึ่งได้จากการผสมสารเคมีดังนี้คือ กรดบอริก (H_3BO_3) กับกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โมล ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นกรดไฮโดรฟลูออบอริก เป็นไปตามสมการดังนี้



นำกรดไฮโดรฟลูออบอริกที่ได้ไปเจือจางลดความเข้มข้นด้วยน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 17 : 1,000 มิลลิลิตรตามลำดับ (กรด 17 มิลลิลิตร ต่อน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร) แล้วจึงนำมากัดผิวหน้าชิ้นงานเป็นเวลา 3 นาที จึงล้างด้วยน้ำและเป่าให้แห้ง แล้วนำไปศึกษาหาขนาดของเกรนต่อไป

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.2.1. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

ตรวจสอบโครงสร้างที่กำลังขยาย 50, 100, 200, 500, 1,000 เท่า

3.2.2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบกวาด(Scanning Electron Microscope, SEM) ตรวจสอบโครงสร้างที่กำลังขยายสูงกว่า 1,000 เท่า

3.2.3 การคำนวณขนาดเกรนและศึกษาความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงานจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1) นำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 200 เท่า ที่ใช้ตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกตามวิธีการในข้อ 3.1.3 มาตรวจสอบหาขนาดเกรนด้วยวิธี Quantitative Analysis แบบ Line Measurement^[11] ในบริเวณที่แตกต่างกันอย่างละ 10 ภาพ ทั้งชิ้นงานที่เป็นบริเวณผิว, ระหว่างผิวกับใจกลาง และใจกลางชิ้นงาน

2) กำหนดจุดตรวจสอบบนภาพ แล้วจึงสร้างวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ 8 เซนติเมตร แล้วจึงคำนวณเปรียบเทียบกับขนาดกำลังขยายของภาพ (ได้ 320 ไมครอน) ลากเส้นผ่านศูนย์กลางลงบนภาพถ่ายระบุจุดที่ตัดขอบเกรนที่เส้นผ่านศูนย์กลาง หาขนาดเกรนโดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณเปรียบเทียบกับขนาดกำลังขยายของภาพแล้ว หาค่าด้วยจำนวนจุดที่เส้นผ่านศูนย์กลางตัดขอบเกรน จึงจะได้ค่าขนาดของเกรนดังภาพที่ 3.4

3) นำค่าขนาดของเกรนที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตตามสมการ ดังนี้

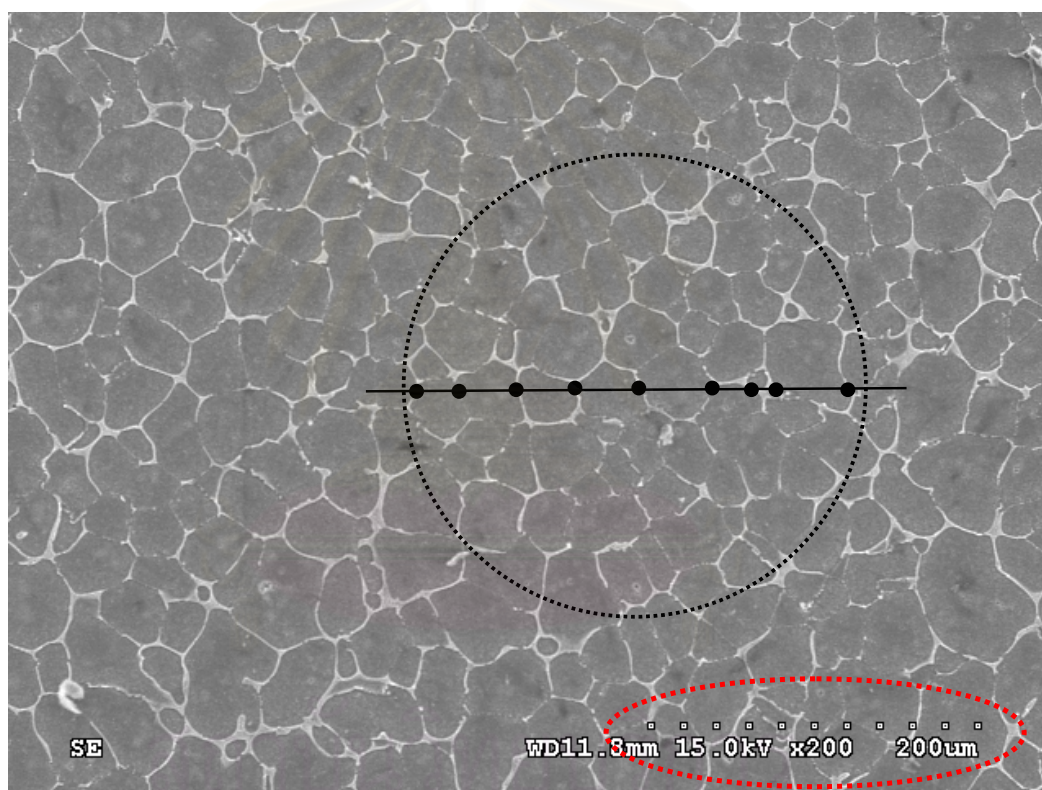
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (3.2)$$

เมื่อ X_i คือ ขนาดของเกรนที่ตำแหน่งใดๆ
 N คือ จำนวนตำแหน่งที่ทำการวัดทั้งหมด

4) นำค่าขนาดของเกรนที่คำนวณได้ไปหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยใช้สมการทางสถิติ คือ

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N}} \quad (3.3)$$

โดยเริ่มคำนวณตั้งแต่ 2 ตำแหน่ง และเพิ่มขึ้นทีละตำแหน่งไปจนถึงจำนวนตำแหน่งที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ จึงจะทำให้ทราบจำนวนตำแหน่งน้อยที่สุดที่เหมาะสมในการใช้หาค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนต่อไป



$$\text{Average grain size} = \frac{\text{Diameter Length}}{\text{Point counting}}$$

ภาพที่3.4 วิธีการคำนวณขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ประเภท LFEC.

โดยตัวอย่างนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลางที่ 8 เซนติเมตรคำนวณเปรียบเทียบกับขนาดกำลังขยายของภาพ ได้คือ 320 ไมครอน หาคด้วยจำนวนจุดที่เส้นผ่านศูนย์กลางตัดขอบเกรนคือ 9 ซึ่งจะได้ค่าขนาดของเกรนเป็น 35.56 ไมครอนนั่นเอง

3.2.4. การวิเคราะห์หาขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

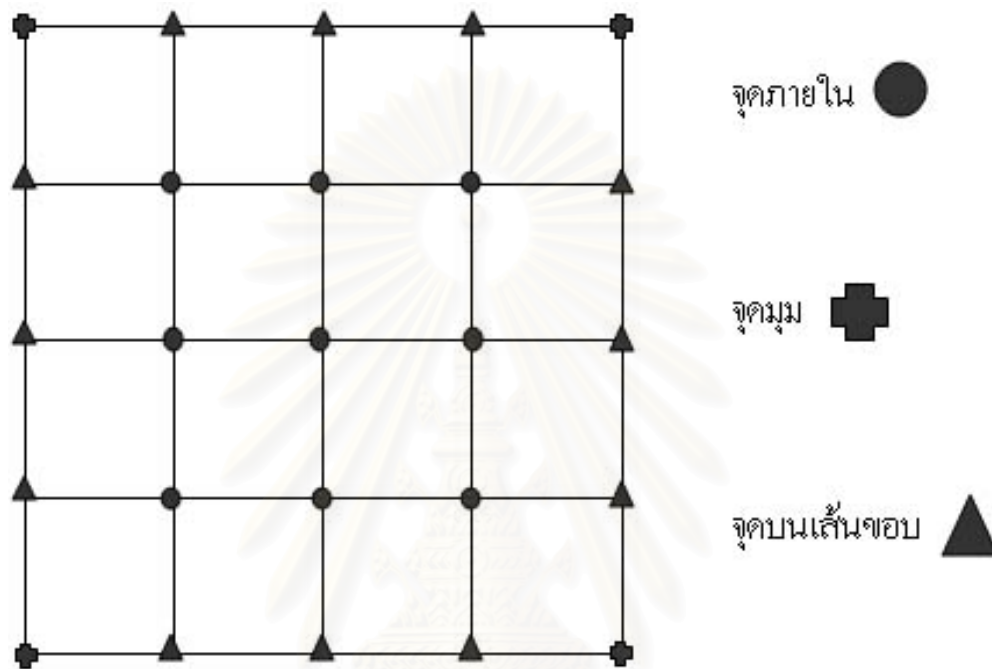
1) นำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด กำลังขยาย 1000 เท่า ที่ใช้ตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกตามวิธีการในข้อ 3.1.3 มาตรวจสอบหาขนาดเกรนด้วยวิธี Quantitative Analysis แบบ Point Counting ^[11] ในบริเวณที่แตกต่างกันอย่างละ 100 ภาพ ทั้งชิ้นงานที่เป็นบริเวณผิว, ระหว่างผิวกับใจกลาง และใจกลางชิ้นงาน

2) กำหนดจุดตรวจสอบบนภาพ แล้วสร้างจุดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร และระบุจุดย่อยลงบนภาพภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมโดยแบ่งด้านแต่ละด้านออกเป็น 4 ส่วน เท่ากันดังภาพที่ 3.5

3) คำนวณค่าเฉลี่ยทั้ง 100 ภาพในข้อ 1) เพื่อหาสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน โดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏในแต่ละพื้นที่ของโครงสร้างที่เป็นยูเทคติกเปรียบเทียบกับจุดที่ปรากฏในแต่ละพื้นที่ของ พื้นี่โครงสร้างพื้นฐาน โดยมีกฎเกณฑ์ในการนับจุดดังนี้คือ จุดภายใน 9 จุดให้นับจำนวนจุดเป็น 9 จุด (คิดเฉลี่ยโดยน้ำหนักของจุดบนเส้นขอบเป็น 1.00), จุดบนเส้นขอบที่ไม่ใช่จุดมุม รวมทั้งหมด 4 ด้านมี 12 จุดให้นับ 2 จุดคิดเป็นหนึ่งจุด ดังนั้นรวมมีจุดบนเส้นขอบ 6 จุด (คิดเฉลี่ยโดยน้ำหนักของจุดบนเส้นขอบเป็น 0.50), จุดมุมอีก 4 จุดนับ 4 จุดคิดเป็นหนึ่งจุด ดังนั้นรวมมีจุดมุม 1 จุด (คิดเฉลี่ยโดยน้ำหนักของจุดมุมเป็น 0.25) ดังนั้นสำหรับพื้นที่สี่เหลี่ยมนี้คิดให้มีความหนาแน่นของพื้นที่ทั้งหมดเทียบเป็นจุดคือ 16 จุดนั่นเอง ซึ่งจะแสดงการคำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานโดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏในภาพที่ 3.6

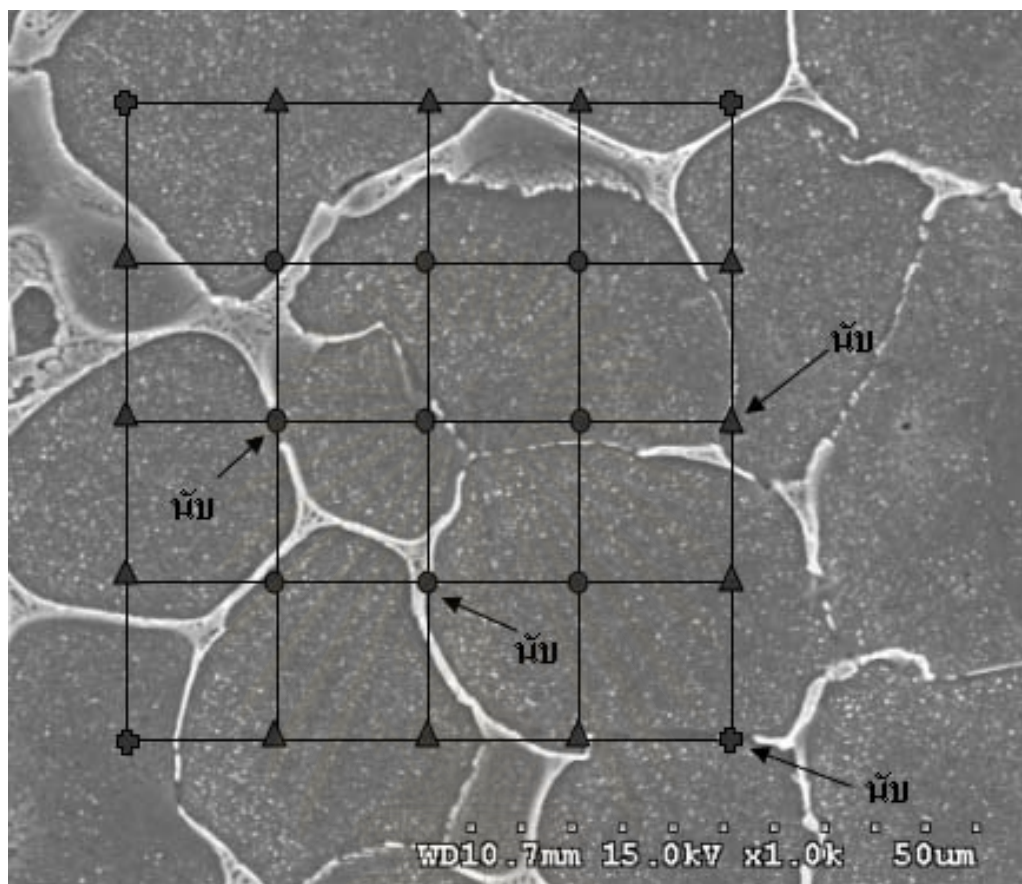
4) นำค่าเฉลี่ยสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานที่คำนวณได้ไปหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้สมการทางสถิติเหมือนกับที่ ทำในขั้นตอนการคำนวณขนาดเกรน

โดยเริ่มคำนวณตั้งแต่ 2 ตำแหน่ง และเพิ่มขึ้นทีละตำแหน่งไปจนถึงจำนวนตำแหน่งที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ จึงจะทำให้ทราบจำนวนภาพน้อยที่สุดที่เหมาะสมในการใช้หาค่าเฉลี่ยของสัดส่วนความหนาแน่นของ พื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน



ภาพที่3.5 การสร้างจุดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้คำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่
โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



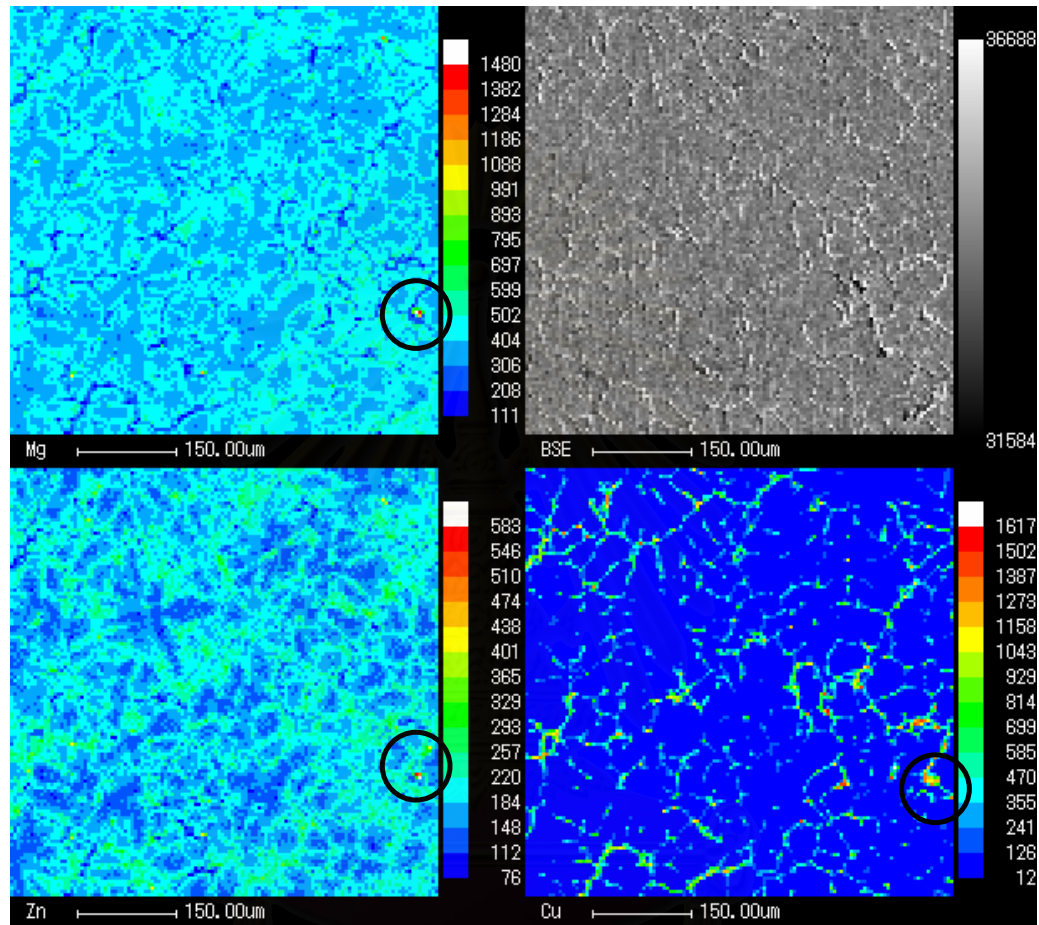
ภาพที่3.6 การคำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานโดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดกำลังขยาย 1000 เท่า

จากภาพที่3.6 จะสามารถนับจุดที่ตกลงบนบริเวณพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติก โดยคำนวณตามกฎเกณฑ์น้ำหนักของตำแหน่งตามจุดได้คือ จุดภายในนับ $2 \times 1 = 2$ จุด, จุดบนเส้นขอบนับ $1 \times 0.5 = 0.5$ จุด, จุดมุมนับ $1 \times 0.25 = 0.25$ ดังนั้นสำหรับพื้นที่สี่เหลี่ยมที่กำลังตรวจสอบนี้คิดให้พื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกคือ $2 + 0.5 + 0.75 = 2.75$ จุด และคิดความหนาแน่นของพื้นที่ทั้งหมดเทียบเป็นจุดคือ 16 จุด ซึ่งจะคำนวณร้อยละของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานเป็น $(2.75/16) = 17.19\%$ นั่นเอง

4.2.6 เครื่องตรวจสอบแบบ Electron Probe Micro Analyzer, EPMA ตรวจสอบการกระจายตัว และวิเคราะห์ธาตุผสมในเนื้อโครงสร้างและวิเคราะห์ธาตุผสมเพื่อระบุสารประกอบของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏ

โดยมีการตั้งค่าความต่างศักย์ของรังสี เป็น 15.0 กิโลโวลต์ และขนาดความกว้างของรังสีเป็น 100 ไมโครเมตร เลือกช่องตรวจสอบธาตุสังกะสีแบบใช้ LIF ตรวจสอบธาตุทองแดงแบบใช้ LIF และตรวจสอบธาตุแมกนีเซียมแบบใช้ RAP แล้วจึงทำการสแกนตรวจสอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยกำหนดจุดตรวจสอบย่อยในบริเวณดังกล่าวทั้งหมด 16,000 จุด และมีระยะห่างระหว่างจุดเท่าๆ กัน กำหนดเวลาในการตรวจสอบต่อจุดประมาณ 0.1 วินาที และนำผลที่ได้ที่เป็นจำนวนความถี่ของการตรวจสอบแต่ละจุดย่อยไปคำนวณเป็นค่าส่วนผสมของแต่ละธาตุ โดยเปรียบเทียบผ่านสมการที่อนุมาณความสัมพันธ์ว่าเป็นเส้นตรงที่มี ความชันเป็นอัตราส่วนของส่วนผสมเฉลี่ยของแต่ละธาตุกับความถี่ในการตรวจสอบที่เป็นจำนวนครั้งเฉลี่ยตามสมการ $\% \text{Composition} = (\text{Slop}) (\text{ความถี่ในการนับ})$ ดังเช่นภาพที่ 3.7 ที่เป็นผลของการตรวจสอบด้วย EPMA

ซึ่งจะแสดงธาตุผสมในเนื้อโครงสร้างจุลภาคได้แก่ ธาตุแมกนีเซียมฝังบนขั้ว, ธาตุสังกะสีฝังล่างขั้ว, ธาตุทองแดงฝังล่างขาซ้ายและโครงสร้างจุลภาคที่แสดงอยู่ที่ฝังบนขวา โดยจะแสดงผลปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมเป็นลักษณะของจุดสีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นน้อยสุดคือสีน้ำเงิน ถึงที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นมากที่สุดคือสีขาว ตามแถบสีที่อยู่ด้านข้างขวา และตัวเลขที่ระบุคือจำนวนความถี่ (นับเป็นจำนวนครั้ง) ของการตรวจสอบพบปริมาณธาตุในแต่ละจุด ซึ่งในภาพที่ 3.7 นี้บริเวณที่วงกลมไว้เป็นบริเวณที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมได้แก่ธาตุแมกนีเซียม, ธาตุสังกะสีและธาตุทองแดงสูงพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้มีเฟสที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง หรือ T(Al-Zn-Mg-Cu) เป็นต้น



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างผลการตรวจสอบด้วย EPMA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การคำนวณเส้นทางและลำดับการแข็งตัวของโครงสร้างจุลภาค

1. การประมาณเส้นทางของการแข็งตัวของแผนภูมิสมดุล (Phase diagram) ด้วยการคำนวณตามสมการการแข็งตัวแบบGulliver-Scheil's ตามทฤษฎีที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่2 หัวข้อย่อย 2.3 ของ

1.1 3 ธาตุ (Al – Zn – Mg)

1.2 2 ธาตุ (Al – Zn, Al – Mg, - Zn – Mg)

ในการหาเส้นทางของการแข็งตัวของโลหะผสม(Al – Zn – Mg) ดังภาพที่ 3.11 นั้นต้องอาศัยสมการที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition, C_L) กับอุณหภูมิ (T) ผ่านอิทธิพลของค่า k ของ 2 ธาตุ(Al – Zn, Al – Mg, - Zn – Mg) จากสมการที่ 3.7 ที่เกิดจากการรวมกันของสมการที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาเส้นทางของการแข็งตัวของโลหะผสมที่มีจำนวนธาตุผสมหลักสามธาตุโดยประยุกต์มาจากสมการที่2.8 คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) ในแบบของ Gulliver-Scheil, $C_s^* = kC_o[1 - f_s]^{k-1}$ มาสร้างเป็นสมการที่3.5 และ 3.6 โดยจะคำนวณหาค่า k จากสมการ3.8 และจะได้ค่า k ของ Al – Zn คือ 0.5, ค่า k ของ Al – Mg คือ 0.4 และค่า k ของ Al – Cu คือ 0.15 แล้วแทนค่า k และแทนค่าอุณหภูมิ(T) ลงในสมการที่ 3.4, 3.5 เพื่อให้ได้ค่า f_s แล้วนำค่า f_s ที่ได้ไปคำนวณหา C_L ของธาตุสังกะสีและแมกนีเซียม โดยใช้สมการ3.7 เพื่อที่จะได้ค่า C_L ของธาตุสังกะสีและแมกนีเซียมกับค่าอุณหภูมิ(T) ไปสร้างเส้นทางของการแข็งตัวของโลหะผสม(Al – Zn – Mg) ซึ่งจะแสดงการคำนวณไว้ในหัวข้อ 4.2.5

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_M - T}{T_M - T_L} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{C_L}{C_o} \right)_{Zn} = (1 - f_s)^{-(1-k_{Al-Zn})} \quad (3.5)$$

$$\left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Mg} = (1 - f_S)^{-(1-k_{Al-Mg})} \quad (3.6)$$

$$\left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Zn} = \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Mg}^{\frac{-1}{1-k_{Al-Mg}}}\right]\right\}^{-(1-k_{Al-Zn})} \quad (3.7)$$

และหาค่า k ของ 2 ธาตุ(Al – Zn, Al – Mg, - Zn – Mg) จากแผนภูมิสมดุล 2 เฟสดังภาพที่ 3.8, 3.9, 3.10 ประกอบการคำนวณด้วยสมการ

$$k = \frac{C_S^*}{C_L^*} \quad (3.8)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

C_O คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว

C_S, C_L คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวตามลำดับ

f_S คือ สัดส่วนปริมาณโลหะที่แข็งตัวแล้ว

C_S^*, C_L^* คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวบริเวณผิว

รอยต่อตามลำดับ

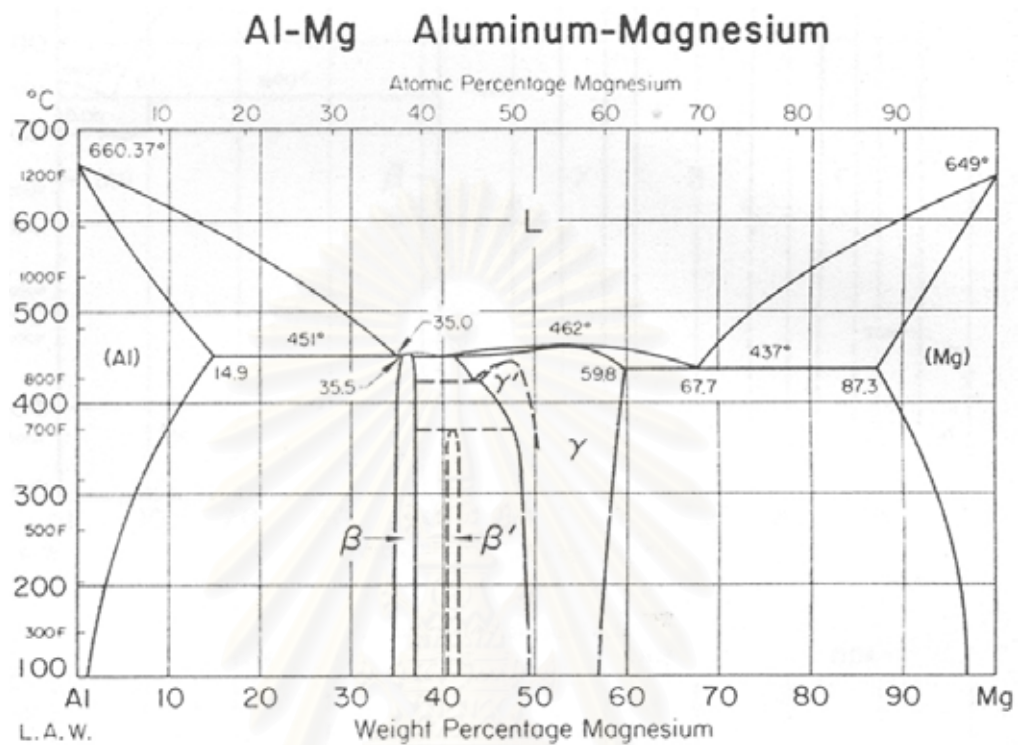
k คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุล

ณ. บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็ง

T คือ อุณหภูมิ หน่วยเป็น K

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลว หน่วยเป็น K

T_L คือ อุณหภูมิของเหลวที่ความเข้มข้นเริ่มแรก หน่วยเป็น K



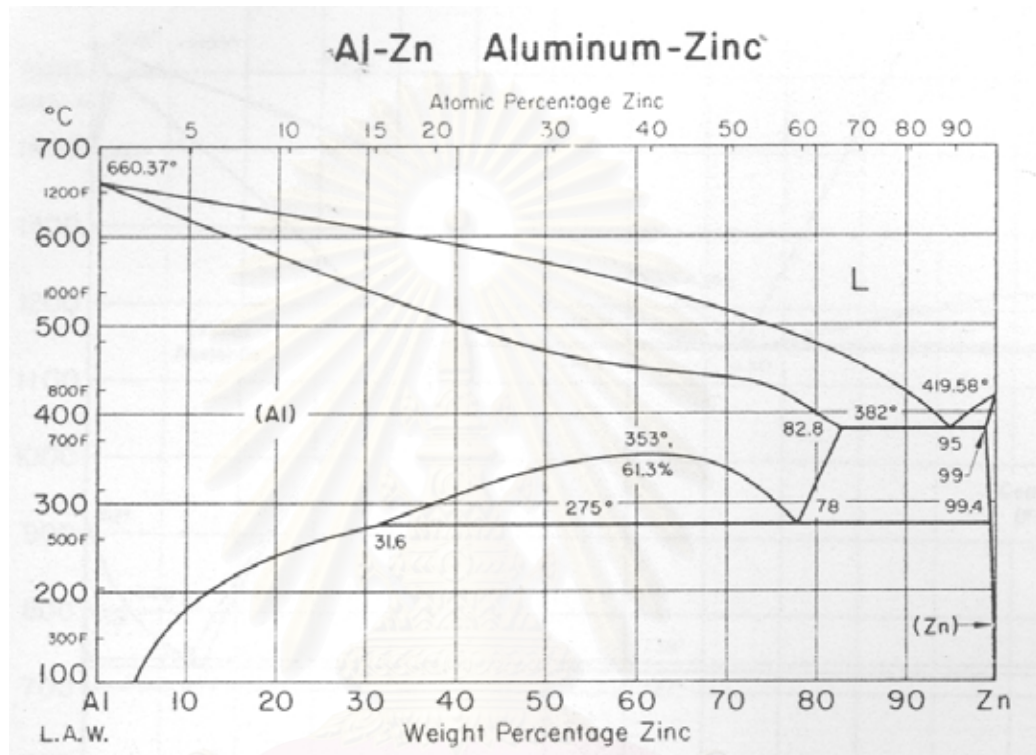
ภาพที่ 3.8 แผนภูมิสมดุล Al-Mg ($k=0.4$) (Al – 9.8Zn – 2.5Mg – 2.3Cu)

จากแผนภูมิสมดุล Al-Mg ที่ตำแหน่ง C_0 2.5%Mg

พบว่าค่า C_s^* เป็น 2.5% และ C_L^* เป็น 6.3%

$$k = \frac{C_s^*}{C_L^*} = \frac{2.5}{6.3}$$

ดังนั้นค่า $k_{Al-Mg} = 0.4$



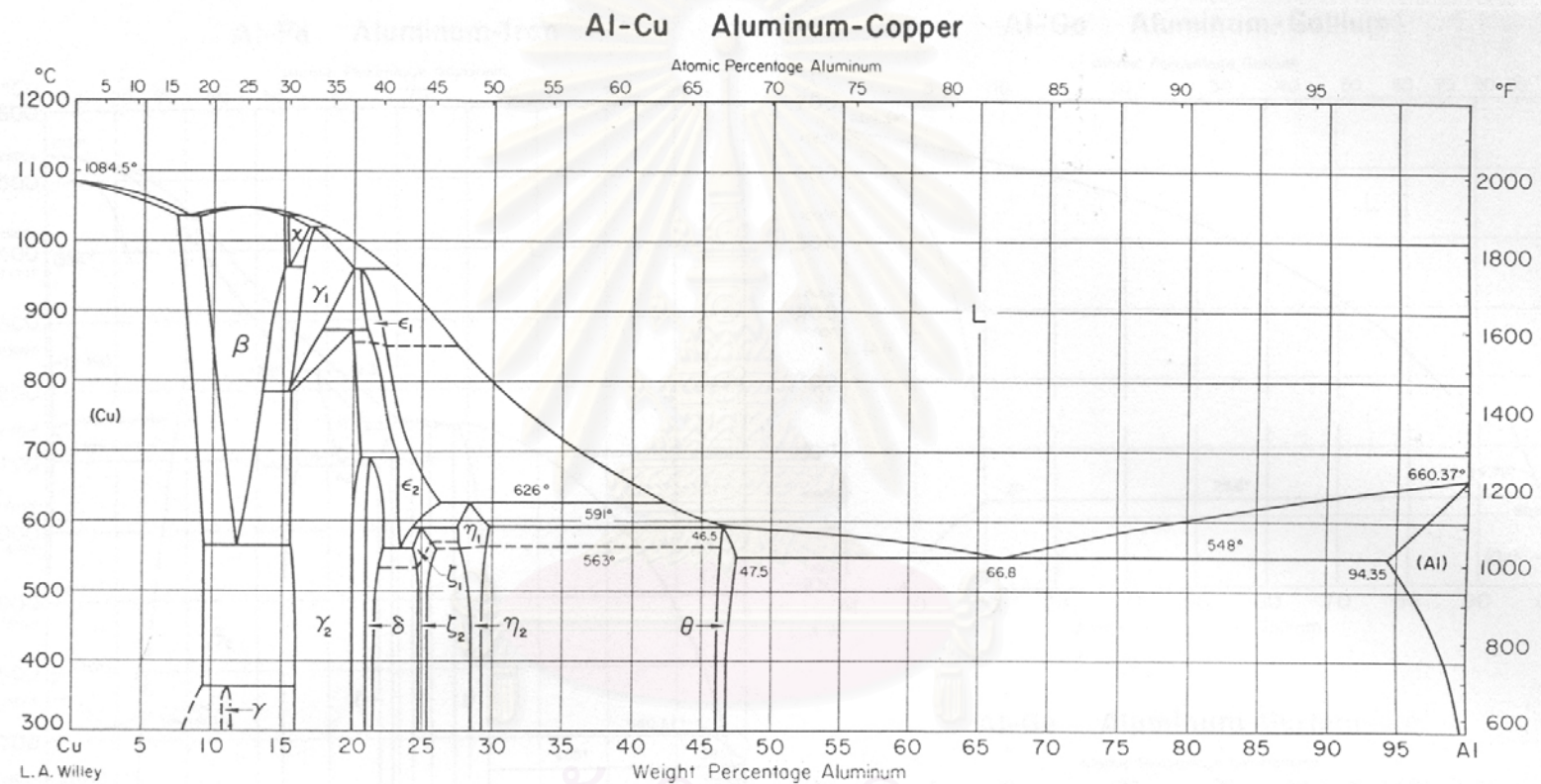
ภาพที่ 3.9 แผนภูมิสมดุล Al-Zn ($k=0.5$) (Al – 9.8Zn – 2.5Mg – 2.3Cu)

จากแผนภูมิสมดุล Al-Mg ที่ตำแหน่ง C_0 9.8%Mg

พบว่าค่า C_s^* เป็น 9.8% และ C_L^* เป็น 19.6%

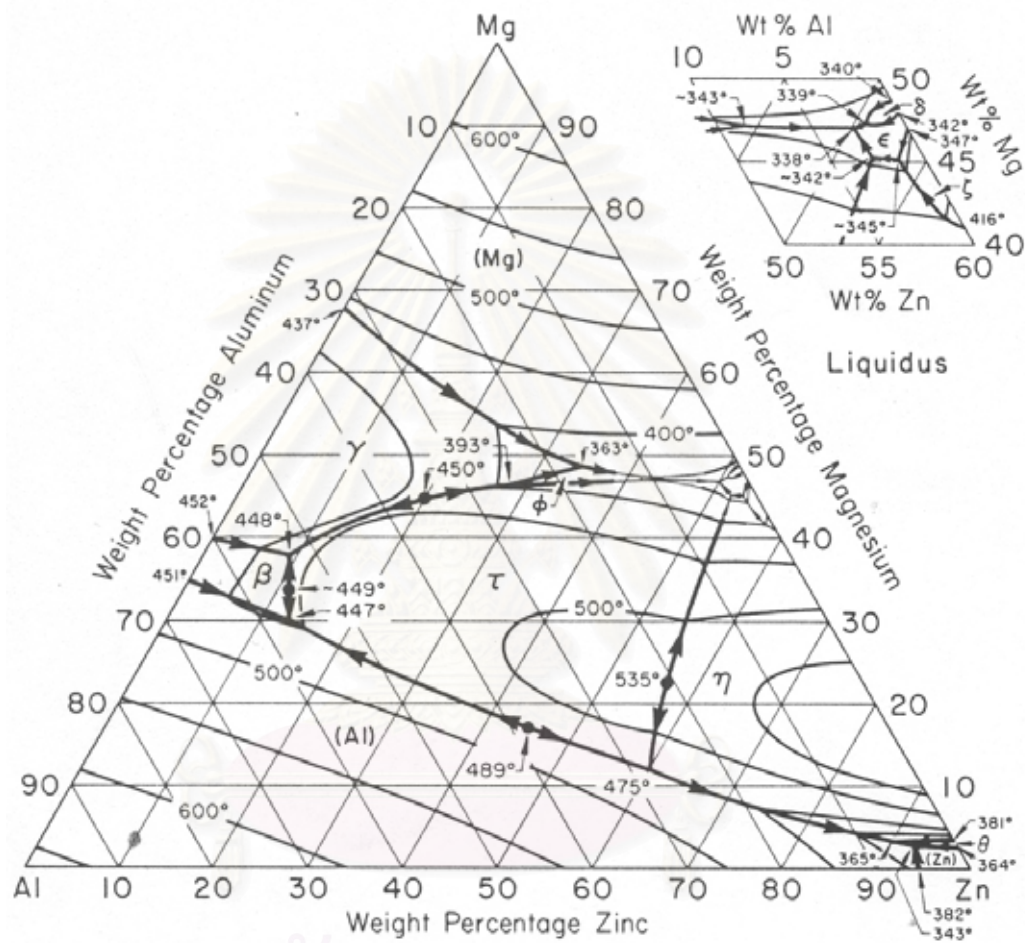
$$k = \frac{C_s^*}{C_L^*} = \frac{9.8}{19.6}$$

ดังนั้นค่า $k_{Al-Zn} = 0.5$



ภาพที่ 3.10 แผนภูมิสมดุล Al-Cu ($k=0.15$) (Al – 9.8Zn – 2.5Mg – 2.3Cu), ที่ตำแหน่ง C_0 2.3%Mg พบว่าค่า C_s^* เป็น 2.3% และ C_L^* เป็น 15.3%

$$\text{ดังนั้นค่า } k_{\text{Al-Cu}} = \frac{2.3}{15.3} = 0.15$$



ภาพที่3.11 แผนภูมิสมดุล Al-Zn-Mg

การคำนวณด้วยโปรแกรม Thermo – Calc.

โปรแกรม Thermo-Calc for Window (TCW 2) คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีการพัฒนาและนำมาใช้ตั้งแต่ปีค.ศ.1981 โดยใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลหรือทำนายลักษณะการเกิดขึ้นของปฏิกิริยา หรือเหตุการณ์ต่างๆเช่น เส้นทางการแข็งตัวของแท่งโลหะ (Scheil-Gulliver solidification simulations), การวิเคราะห์ปฏิกิริยาของแก๊สผสม (partial pressures in gases), การสร้าง Pourbaix diagrams เป็นต้น

สำหรับการนำโปรแกรม Thermo-Calc มาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อ คาดหวังให้แสดงผลเส้นทางการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง โดยใช้หลักการวิเคราะห์จากผลที่มีการคิดค่าพลังงาน Gibb's free energy ที่ให้ค่าต่ำที่สุดของแต่ละข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้อ้างอิง หรือ Data Base ของค่าทาง Thermodynamic เช่น ค่า, Enthalpy, Enthalpy และข้อมูลที่ใช้ในการขนถ่ายมวลสาร หรืออุณหภูมิเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ เป็นต้น ของธาตุและสารประกอบต่างๆ แล้วแต่ที่จะเลือกมาใช้วิเคราะห์แผนภูมิสมดุล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในระบบที่ซับซ้อน มีธาตุผสมหลายธาตุ ไม่เป็นรูปแบบอุดมคติ มีตัวแปรอิสระหลายค่า ได้ถึง 5 ค่าและยังสามารถเลือกรูปแบบในการแสดงผลได้อีกด้วย โดยการวิจัยในครั้งนี้จะเลือกการแสดงผลในรูปแบบของกราฟความเข้มข้นระหว่างสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (f_s) กับอุณหภูมิ (T) โดยมีลำดับในการคำนวณดังนี้

- 1) เลือกระบบที่จะคำนวณ โดยเลือกที่จะคำนวณตามสมการการแข็งตัวแบบ Scheil
- 2) เลือกข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้อ้างอิง หรือ Data Base จากกลุ่มข้อมูล A1-v3
- 3) เลือกธาตุผสมหลัก คือ อะลูมิเนียม (Al), สังกะสี (Zn), แมกนีเซียม (Mg) , และทองแดง (Cu)
- 4) เลือกชนิดของเฟสที่คาดว่าจะพบในโครงสร้างจุลภาค ดังนี้ Liquid (α) , Al_2Cu , FCC-Al , $MgZn_2$, $S(Al_2CuMg)$ และ $T(Al-Cu-Mg-Zn)$

- 5) กำหนดค่าส่วนผสมของธาตุผสมตามร้อยละของน้ำหนัก สังกะสี (Zn) เป็น 9.8 , แมกนีเซียม (Mg) เป็น 2.5 และ ทองแดง (Cu) เป็น 2.3
- 6) กำหนดค่าประจำแกน X เป็นค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส และประจำแกน Y เป็นสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (BS , Mass Fraction of Solid Phase)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

พบความแตกต่างอย่างชัดเจนเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างและ ขนาดรูปร่างของเกรนบน ชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วย กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการ ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) กับชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field)



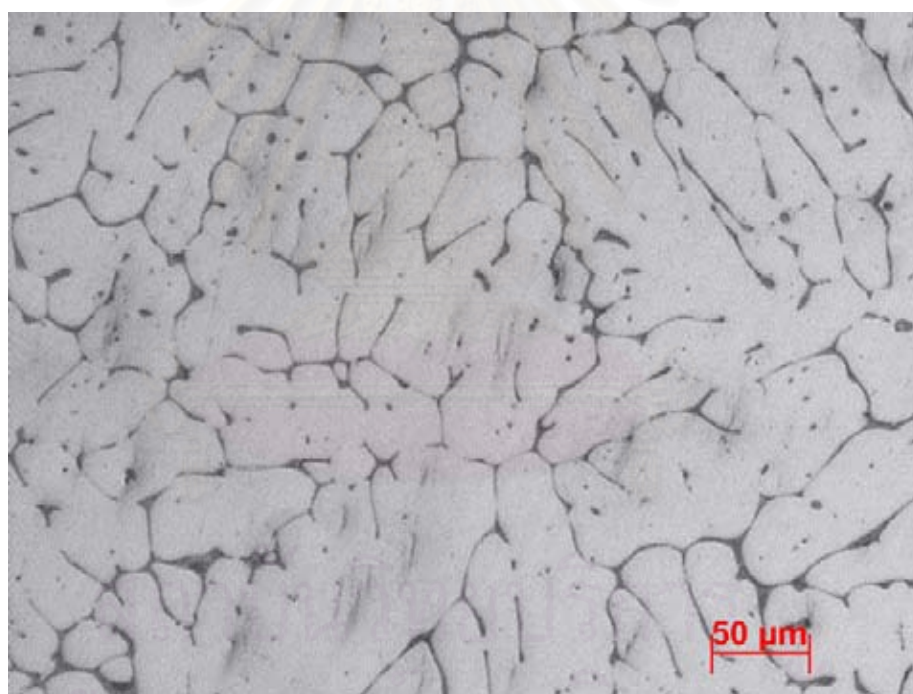
ภาพที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคของDC(ซ้าย), LFEC(ขวา)

ชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วย กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการ ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) จะมีขนาด

โครงสร้างมหภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ แสดงขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานโลหะหล่อที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4.2.1 ความแตกต่างขนาดรูปร่างของเกรนบนชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) กับ ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 4.2 ผลโครงสร้างจุลภาคของ DC

เกรนที่มองเห็นชัดว่าเป็นเกรนสมบูรณ์แล้วของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) ดังภาพที่ 4.3

จะมีขนาดโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ และมีขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานโลหะหล่อ ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่4.2

ซึ่งรูปร่างของเกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นวงกลมมากกว่ารูปร่างของเกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่4.3 ผลโครงสร้างจุลภาคของLFEC

โดยสาเหตุที่ทำให้เกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) จะมีขนาดโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ และมีขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานโลหะหล่อ ที่ไม่มีการ

ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องมาจากผลของแรงที่เกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำของ
กระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก และแรงที่เกิดขึ้นมานี้จะทำหน้าที่กวนน้ำโลหะหลอมเหลวอยู่

ตลอดเวลาในขณะที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งน้ำโลหะบริเวณติดกับผิวขอบแบบหล่อจะเริ่มมีการแข็งตัว ดังนั้นการที่มีแรงมากวนน้ำโลหะนั้น จะส่งผลทำให้บางส่วนของน้ำโลหะบริเวณขอบที่เริ่มมีการแข็งตัวแล้วเกิดการแตกตัวออกเป็นอนุภาคของแข็งเล็กๆ แล้วกระจายตัวไปอยู่ในทุกๆ บริเวณหรือทุกๆ ส่วนของน้ำโลหะหลอมเหลว หลังจากนั้นการแข็งตัวก็เกิดขึ้นต่อไปจากอนุภาคของแข็งเล็กๆ ที่กระจายอยู่ จนการแข็งตัวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยที่ทุกๆ บริเวณของน้ำโลหะหลอมเหลวจะมีลักษณะการแข็งตัวและทิศทางการแข็งตัวเกิดขึ้นภายในเวลา, พื้นที่และพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ได้ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นเป็นไปตามผลการตรวจสอบข้างต้น

อย่างไรก็ตาม การสรุปลักษณะความแตกต่างดังกล่าวข้างต้น ถือว่ายังไม่เหมาะสมนักให้ทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ควรสรุปความแตกต่างโดยระบุให้ชัดเจนเป็นปริมาณหรือตัวเลขที่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นการหาขนาดเกรนจึงต้องทำการศึกษาต่อ และจะแสดงผลของการตรวจสอบในหัวข้อต่อไปคือ การคำนวณขนาดเกรนและศึกษาความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงานจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 การคำนวณขนาดเกรนและศึกษาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงานจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

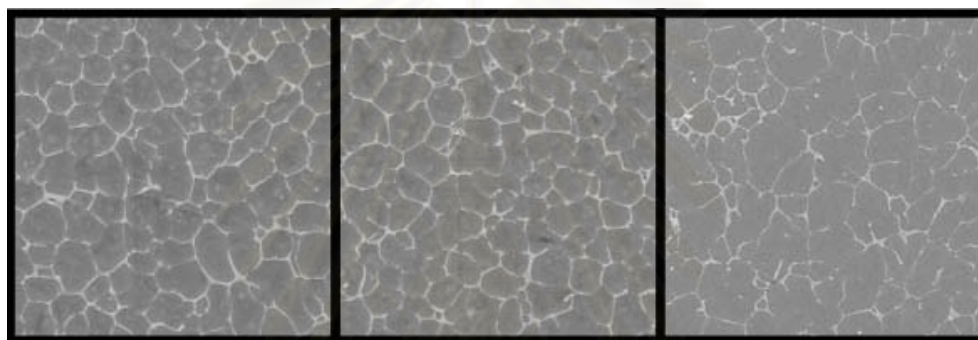
นำค่าขนาดของเกรนที่วัดได้ไปหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต และหาค่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมในการวัดครั้งต่อไปจากการวัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจากผลการวัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทดลองพบว่า จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอจนเกือบคงที่ หรือไม่มีความผันผวนมากนักซึ่งในทางสถิติถือว่าเป็นปริมาณหรือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่มากและเหมาะสมเพียงพอในการนำมาคำนวณค่าอื่นๆทางสถิติต่อไป ซึ่งในกรณีของการวัดขนาดของเกรนในการวิจัยนี้คือ จำนวนการตรวจสอบกลุ่มตัวอย่างจำนวนตั้งแต่ 30 ข้อมูลขึ้นไป(ดังผลที่แสดงในภาพที่ 4.6) โดยที่ขนาดของเกรนชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นจะมีค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนของแต่ละตำแหน่ง โดยเริ่มตรวจวัดจากผิวชิ้นงานเข้ามาถึงกึ่งกลางชิ้นงานและแบ่งตรวจสอบเพิ่มตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างผิวชิ้นงานกับ ใจกลางชิ้นงานหรือที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี โดยในการหาค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนที่แต่ละตำแหน่งนั้นจะใช้วิธีทางสถิติโดยใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 พื้นที่ตรวจสอบและแสดงผลผ่านแผนภาพฮิสโทแกรมดังตัวอย่างในภาพที่ 4.7 และค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนที่แต่ละตำแหน่งจะได้ค่าดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนของโครงสร้างจุลภาคของ LFEC บริเวณต่างๆ

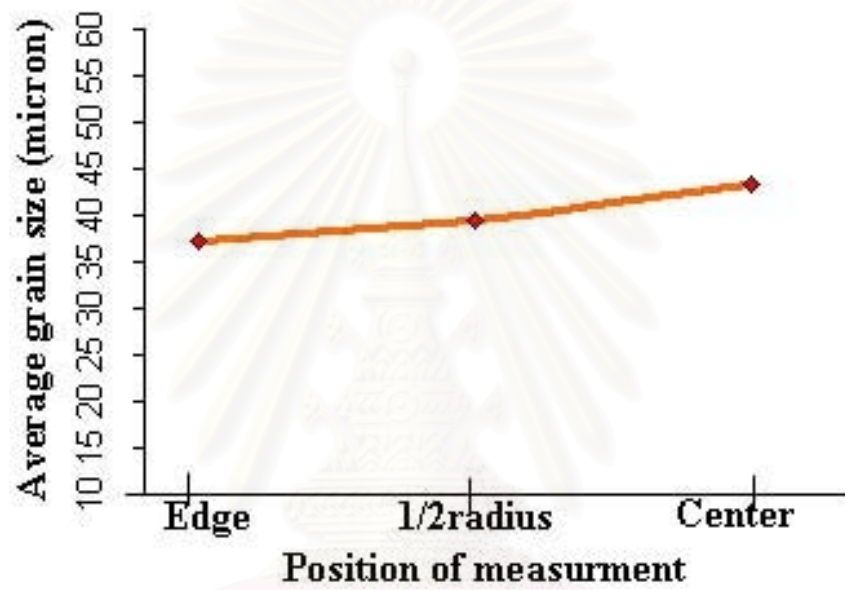
Grain Size (Micron)		
Center	Half of Radius	Edge
43.4	39.5	37.1

และมีลักษณะของโครงสร้างจุลภาคแสดงไว้ในภาพที่ 4.4, 4.5 ซึ่งจะพบว่าที่ผิวชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนน้อยที่สุดคือประมาณ 37.1 ไมครอน และขนาดเกรนจะโตขึ้นเมื่อตรวจสอบไล่เข้ามาถึงที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี และมีแนวโน้มที่โตมากขึ้นจนถึงกึ่งกลางชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ย

ขนาดของเกรนมากที่สุดคือประมาณ 43.4 ไมครอน แต่การกระจายตัวของขนาดเกรนในตำแหน่งต่างๆ ถือว่าไม่แตกต่างกันมาก หรือสรุปได้ว่ามีความสม่ำเสมอมากนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) ที่สรุปโดยนักวิจัยชาวจีน^[9] ที่มีค่าประมาณ 80 – 200 ไมครอนจากบริเวณผิวถึงกึ่งกลางตามลำดับ



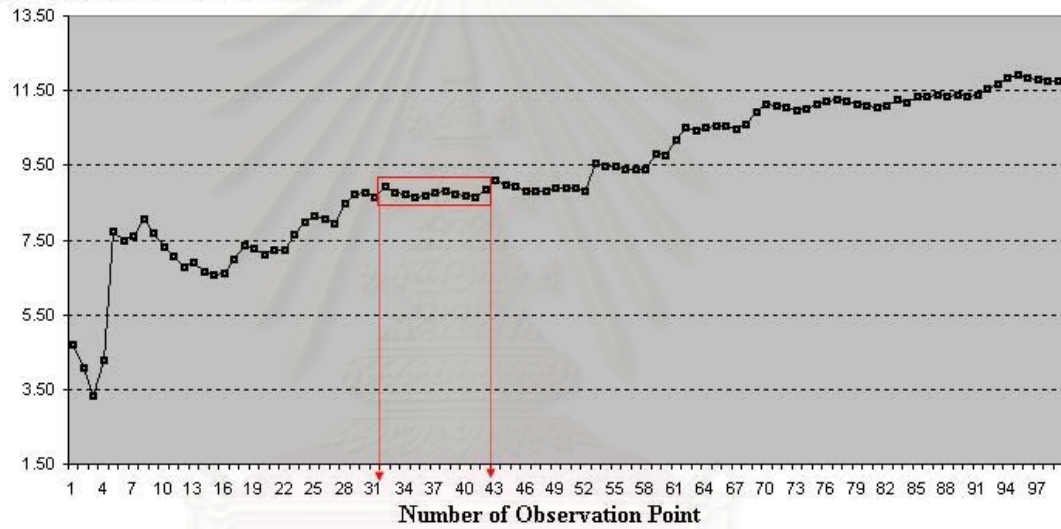
ภาพที่4.4 โครงสร้างจุลภาคของLFEC บริเวณต่างๆโดยเริ่มจากซ้ายสุดคือผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 4.5 กราฟขนาดเกรนของโครงสร้างจุลภาคของLFECบริเวณต่างๆ

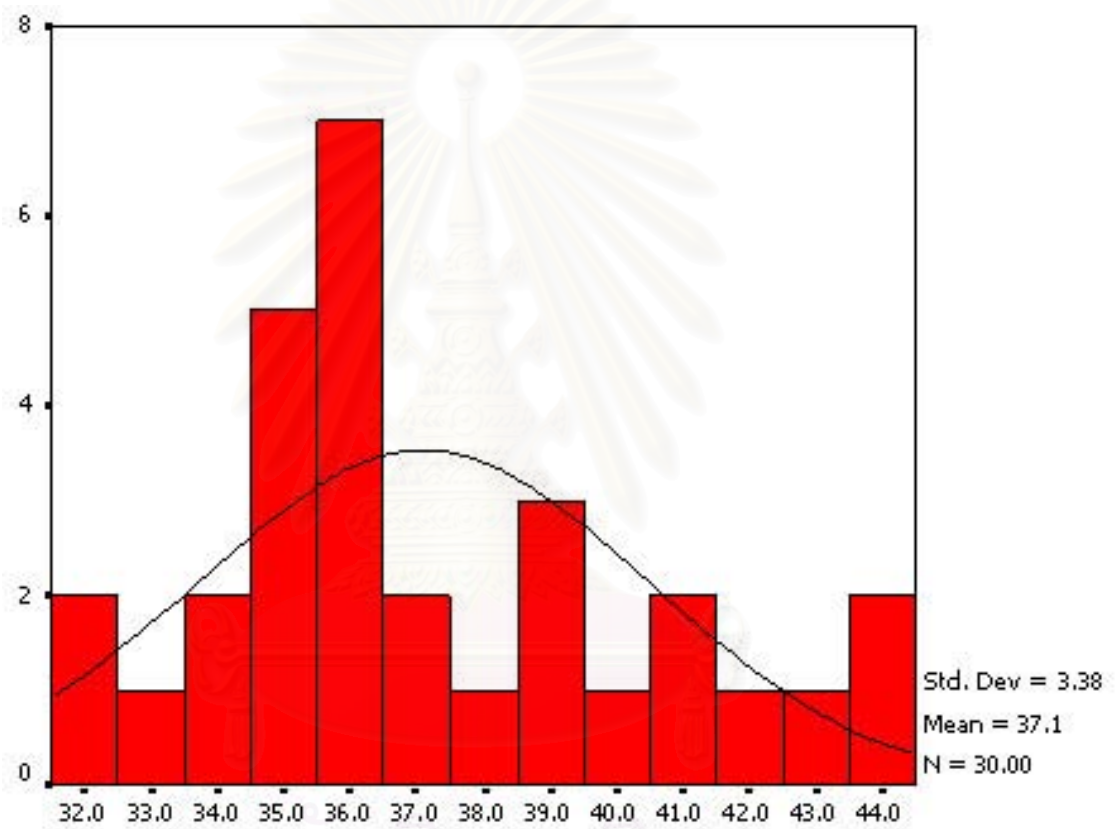
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Standard Deviation of Grain Size



ภาพที่ 4.6 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเกรนโครงสร้าง
จุลภาคของLFEC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.7 กราฟฮิสโทแกรมของขนาดเกรนโครงสร้างอาคารของLFEC

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 การคำนวณขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

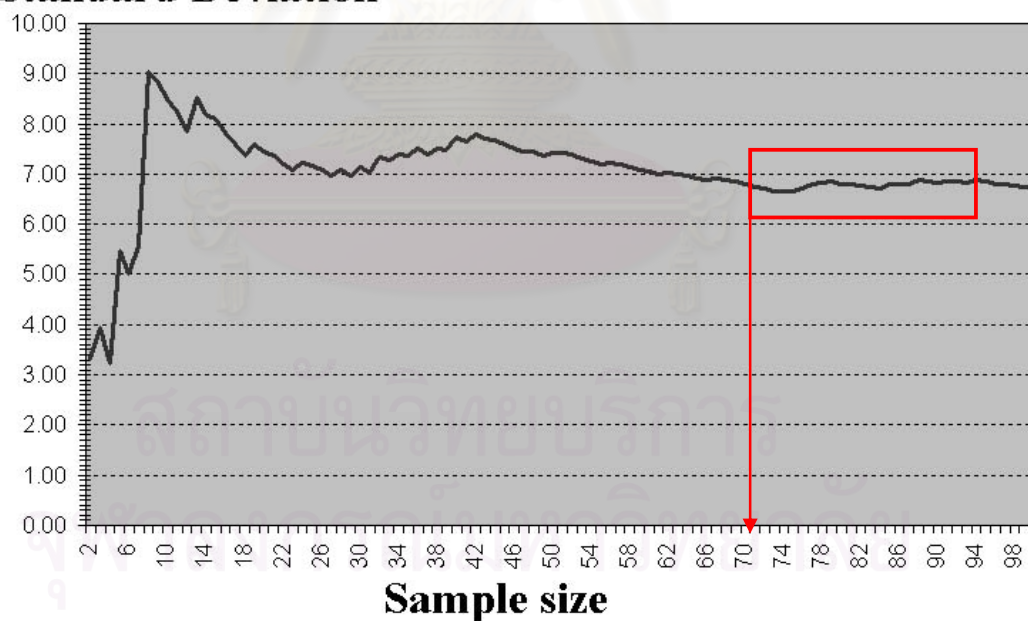
นำค่าสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็น ยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่วัดได้ไปหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต และหาค่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมในการวัดครั้งต่อไปจากการ วัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจากผลการวัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทดลองพบว่า จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ จนเกือบคงที่ หรือไม่มีความผันผวนมากนักซึ่งในทางสถิติถือว่าเป็นปริมาณหรือจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่มากและเหมาะสมเพียงพอในการนำมาคำนวณค่าอื่นๆทางสถิติต่อไป ซึ่งในกรณีของการวัดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในการวิจัยนี้คือจำนวนการตรวจสอบกลุ่มตัวอย่างจำนวนตั้งแต่ 70 ข้อมูลขึ้นไป(ดังผลที่แสดงในภาพที่4.8) โดยที่สัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นจะมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน ของแต่ละตำแหน่งโดยเริ่มตรวจวัดจากผิวชิ้นงานเข้ามาถึงกึ่งกลางชิ้นงาน และแบ่งตรวจสอบเพิ่มตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่าง ผิวชิ้นงานกับใจกลางชิ้นงานหรือที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี โดยในการหาค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน ที่แต่ละตำแหน่งนั้นจะใช้วิธีทางสถิติโดยใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 101 พื้นที่ตรวจสอบ และค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานที่แต่ละตำแหน่งจะได้ค่าดังตารางที่4.2 ซึ่งจะพบว่าที่ผิวชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานมากที่สุดคือประมาณ 11.90% และขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานจะลดลง เมื่อตรวจสอบไล่เข้ามาถึงที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี และมีแนวโน้มที่ลดลงมากขึ้นจนถึงกึ่งกลางชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานน้อยที่สุดคือประมาณ 9.59% ซึ่งโดยรวมแล้วถือว่าสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มี การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

นั้นจะมีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่
 โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียม
 ผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ไม่มีการ
 ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) ที่สรุปโดย
 นักวิจัยชาวจีน^[8] ที่มีค่าประมาณมากกว่า 12%

ตารางที่4.2 ขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่
 โครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคของLFECบริเวณต่างๆ

EDGE (%)	Half Radius (%)	CENTER (%)
11.90	10.43	9.59

Standard Deviation



ภาพที่4.8 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดสัดส่วนความหนาแน่น
 ของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคของ
 LFEC

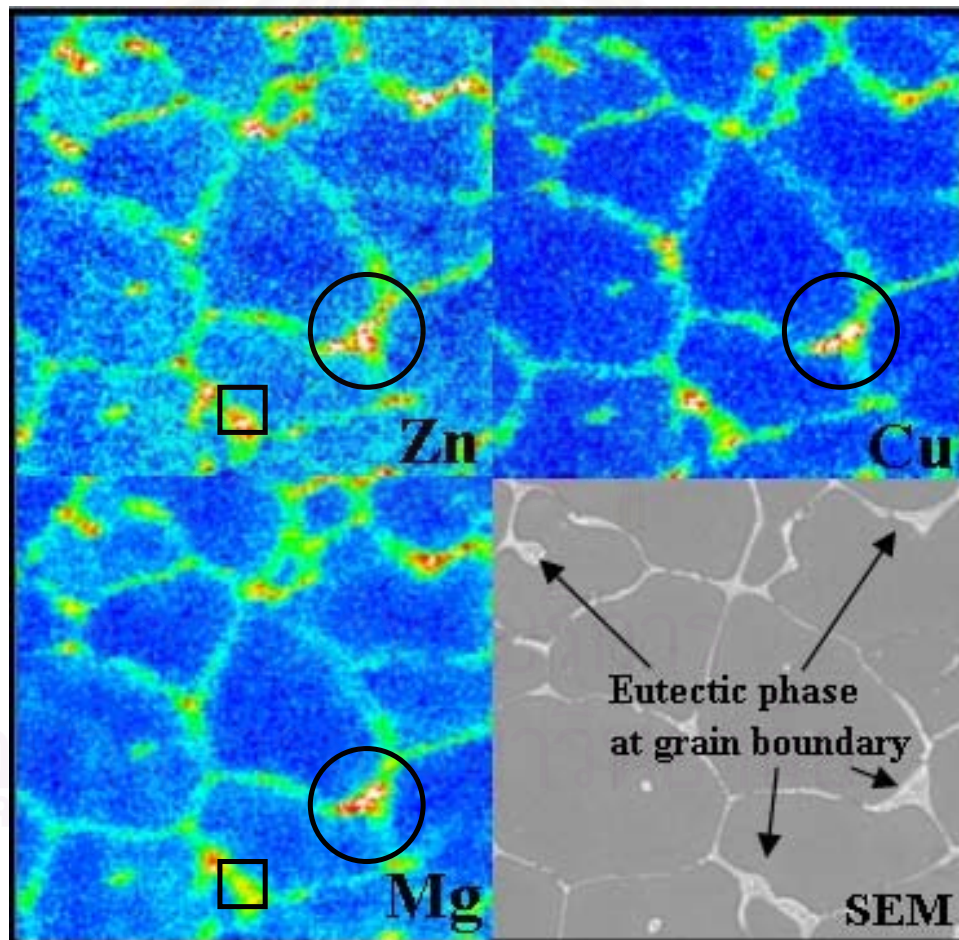
โดยสาเหตุที่ทำให้ค่าสัดส่วนความหนาแน่นของ พื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเท็คติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม- ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นจะมีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเท็คติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียม ผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ไม่มีการ ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) เนื่องจาก ผลของแรงที่เกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก และแรงที่เกิดขึ้นมานี้จะ ทำหน้าที่กวนน้ำโลหะหลอมเหลวอยู่ตลอดเวลาในขณะที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งน้ำโลหะ บริเวณติดกับผิวขอบแบบหล่อจะเริ่มมีการแข็งตัว ดังนั้นการที่มีแรงมากวนน้ำโลหะนั้น จะส่งผล ทำให้บางส่วนของน้ำโลหะบริเวณขอบที่เริ่มมีการแข็งตัวแล้ว เกิดการแตกตัวออกเป็นอนุภาค ของแข็งเล็กๆ แล้วกระจายตัวไปอยู่ในทุกๆ บริเวณหรือทุกๆ ส่วนของน้ำโลหะหลอมเหลว หลังจากนั้นการแข็งตัวก็เกิดขึ้นต่อไปจากอนุภาคของแข็งเล็กๆ ที่กระจายอยู่ จนการแข็งตัวเกิดขึ้น อย่างสมบูรณ์โดยที่ทุกๆ บริเวณของน้ำโลหะหลอมเหลว จะมีลักษณะการแข็งตัวและทิศทางการ แข็งตัวเกิดขึ้นภายในเวลา, พื้นที่และพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ได้ลักษณะของเกรนที่มี ขนาดเล็กและรูปร่างกลม กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ตลอดจนขนาดความหนาแน่นของพื้นที่บริเวณขอบ เกรนก็มีค่าน้อย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี- แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นได้ผลเป็นไปตามการตรวจสอบข้างต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.4 ผลการใช้เครื่อง EPMA ตรวจสอบการกระจายตัว และวิเคราะห์ธาตุผสมในเนื้อ โครงสร้างและวิเคราะห์ธาตุผสมเพื่อระบุสารประกอบของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏ

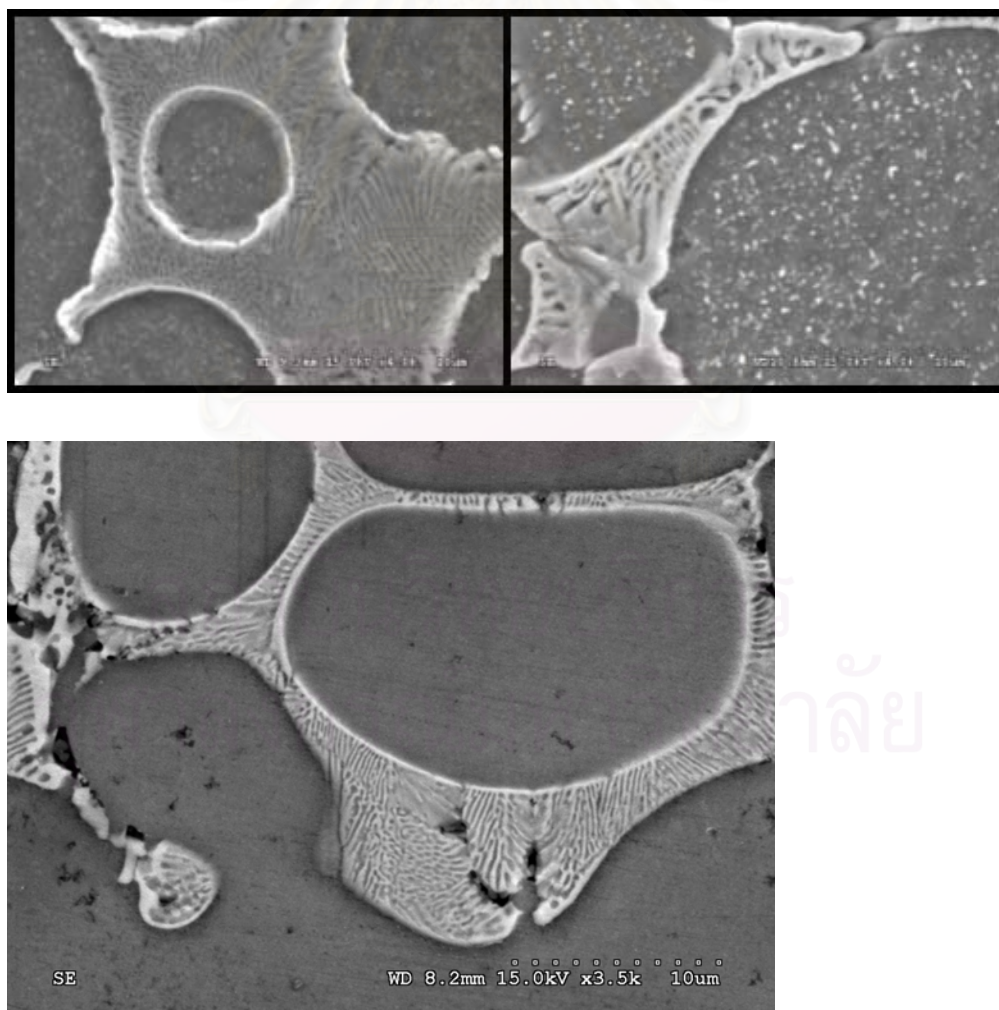
การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุผสมหลัก ที่กระจายอยู่แต่ละตำแหน่งของการตรวจสอบเป็นพื้นที่กว้างที่เรียกว่าการทำ Mapping ซึ่งจะนำผลดังกล่าวไปวิเคราะห์หาชนิดของโครงสร้างยูเทคติก เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจาก Thermo Calc ต่อไป

โดยผลของค่าที่อ่านได้จากภาพที่ 4.9 คือปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้ระบุได้ว่าโครงสร้างยูเทคติกเป็นสารประกอบของธาตุใดบ้างยกตัวอย่างเช่น บริเวณในพื้นที่วงกลม



ภาพที่ 4.9 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของLFECด้วยEPMA

คือบริเวณที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมได้แก่ธาตุแมกนีเซียม, ธาตุสังกะสีและธาตุทองแดงสูงพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้จะเป็นโครงสร้างยูเทคติกเฟสที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง หรือ $T(Al-Zn-Mg-Cu)$ โดยมีลักษณะเป็นแถบสีขาวสลับอยู่บนพื้นโครงสร้างของ α Al และมีพื้นที่ขนาดใหญ่ กับส่วนบริเวณในพื้นที่ที่เหลือคือบริเวณที่พบว่า มีปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมได้แก่ธาตุแมกนีเซียม, ธาตุสังกะสีสูงพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้จะเป็นโครงสร้างยูเทคติกเฟสที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม หรือ $\eta(MgZn_2)$, โดยมีลักษณะเป็นแถบสีขาวสลับอยู่บนพื้นโครงสร้างของ α Al เช่นกันแต่มีพื้นที่ขนาดเล็กเรียวยาว ซึ่งโครงสร้างยูเทคติกทั้ง 2 แบบนี้เป็นโครงสร้างยูเทคติกที่พบมากที่สุดตามผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ ด้วย EPMA และภาพขยายโครงสร้างยูเทคติกทั้ง 2 แบบนี้ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ภาคโครงสร้างยูเทคติกในโครงสร้างจุลภาคของ LFEC ที่กำลังขยายสูง

4.2.5 ผลการอ่านแผนภูมิสมดุล ด้วยการคำนวณตามแบบสมการ Scheil's equation

และผลการคำนวณลำดับการเย็นตัวด้วย Thermo Calc.

จากการคำนวณตามสมการที่กำหนดไว้ในบทที่3 ในหัวข้อที่3.3 การคำนวณทิศทางและลำดับการแข็งตัวของโครงสร้างจุลภาคด้วยการคำนวณตามแบบสมการ Scheil's equationซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

- 1) เลือกอุณหภูมิในการคำนวณที่ 600 °C ของ Al-Zn เพื่อหาค่า f_s จากสมการ3.4

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_M - T}{T_M - T_L} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$f_s = 1 - \left(\frac{660 - 600}{660 - 630} \right)^{\frac{1}{0.5-1}}$$

ได้ค่า f_s เป็น 0.75

- 2) นำค่า f_s ไปแทนในสมการที่3.5 เพื่อหาค่า C_L ของ Zn

$$\left(\frac{C_L}{C_O} \right)_{Zn} = (1 - f_s)^{-(1-k_{Al-Zn})}$$

$$\left(\frac{C_L}{9.8} \right) = (1 - 0.75)^{-(1-0.5)}$$

ได้ค่า C_L ของ Zn เป็น 20%

3) นำค่า C_L ของ Zn ไปแทนในสมการที่ 3.7 เพื่อหาค่า C_L ของ Mg

$$\left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Zn} = \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Mg}^{\frac{-1}{1-k_{Al-Mg}}}\right]^{-(1-k_{Al-Zn})}\right\}$$

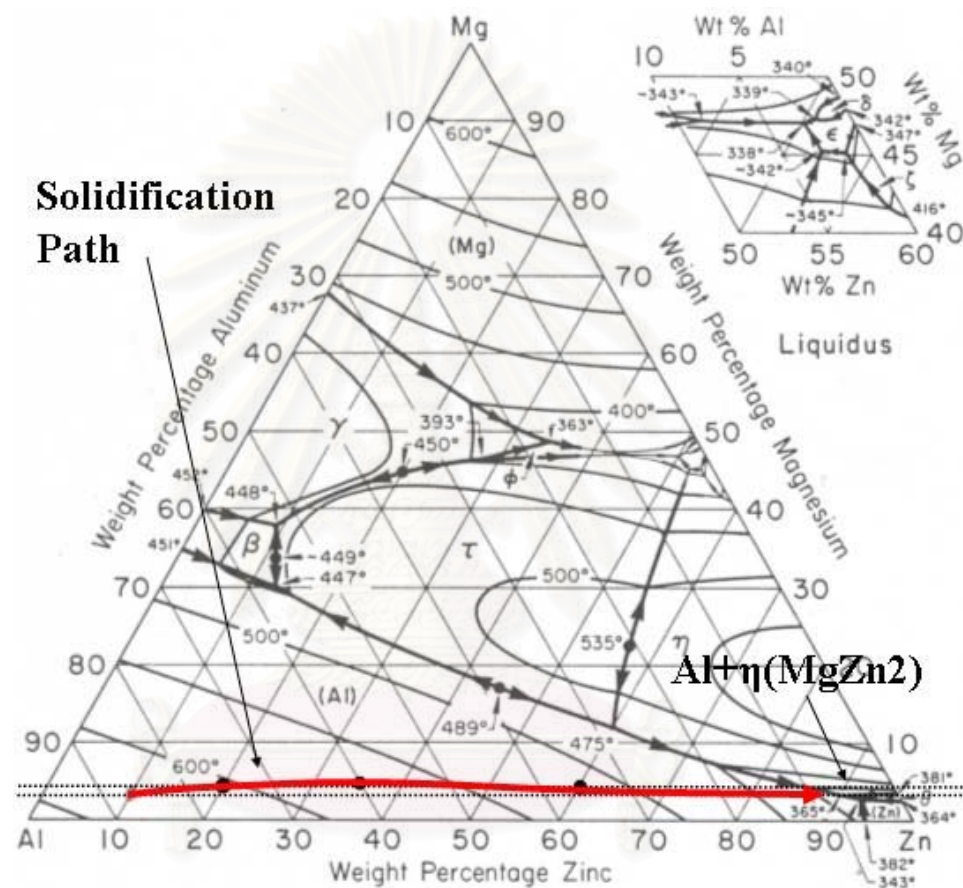
$$\left(\frac{20}{9.8}\right) = \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{C_L}{2.5}\right)^{\frac{-1}{1-0.4}}\right]^{-(1-0.5)}\right\}$$

ได้ค่า C_L ของ Mg เป็น 2.75%

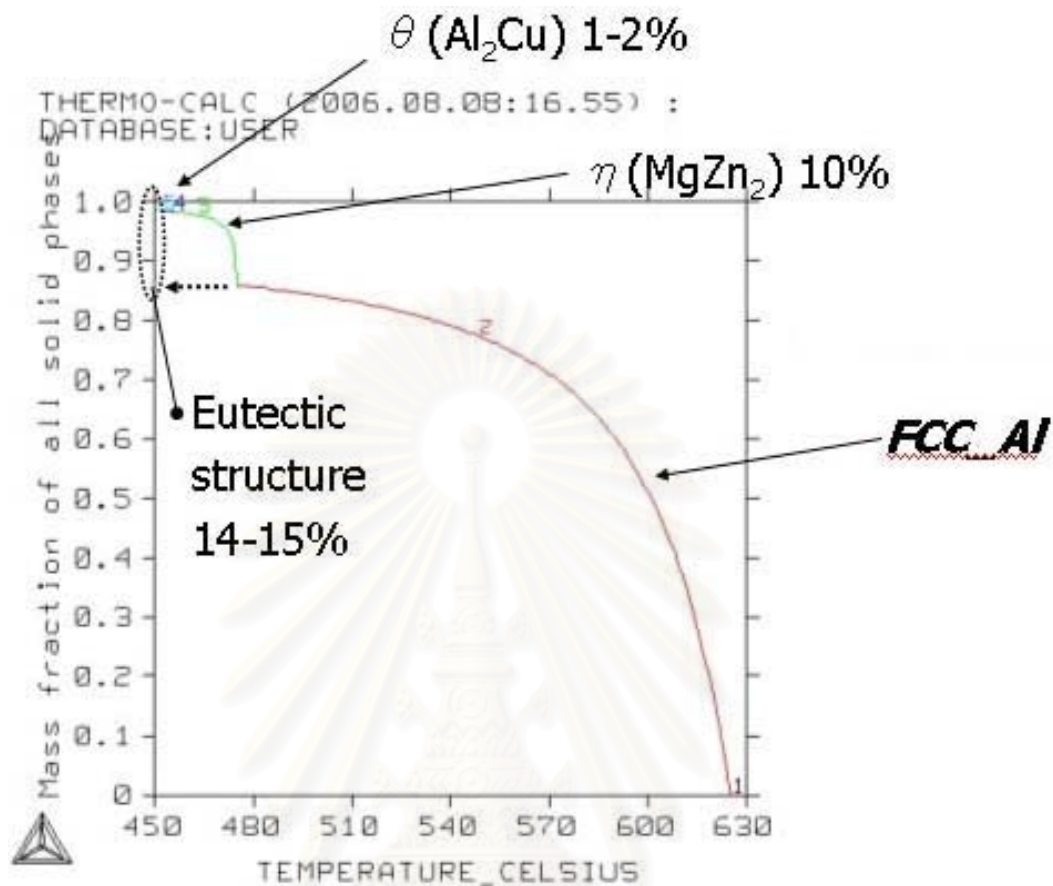
ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มข้นคิดตามร้อยละของน้ำหนักของธาตุผสมตามตารางที่ 4.3 แล้วนำมาเขียนกราฟเส้นทางการเย็นตัวลงบนแผนภูมิสมดุลดังภาพที่ 4.11 ซึ่งทำให้ทราบลำดับการแข็งตัว และเฟสโครงสร้างยูเทคติกแรกคาดว่าเป็น $Al + \eta(MgZn_2)$ ซึ่งตรงกับผลการคำนวณด้วย Thermo Calc ดังภาพที่ 4.12

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี-แมกนีเซียม (% Composition) กับอุณหภูมิ (T)

Temp(C ^o)	%Zn	%Mg
600	20	2.75
580	26	2.61
560	33	2.56
540	40	2.54
520	46	2.52
500	53	2.51
480	60	2.51



ภาพที่ 4.11 ผลเส้นทางการเย็นตัวบนแผนภูมิสมดุล Al-Zn-Mg จากค่าความสัมพันธ์
ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี- แมกนีเซียม (% Composition)
กับ อุณหภูมิ (T) ตามแบบสมการ Gulliver-Scheil's equation



ภาพที่ 4.12 ผลการคำนวณด้วย Thermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu

จากผลเส้นทางการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงจากการคำนวณด้วย Thermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu ตามระบบสมการ Gulliver-Scheil's equation ดังภาพที่ 4.12 นั้นแสดงให้เห็นว่าการแข็งตัวเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 620 °C และผลเส้นทางการแข็งตัวมีลำดับดังนี้

1. LIQUID
2. LIQUID FCC_Al
3. LIQUID FCC_Al MgZn₂
4. LIQUID FCC_Al MgZn₂ S(Al_2CuMg)
5. LIQUID Al_2Cu FCC_Al MgZn₂ S(Al_2CuMg)
6. LIQUID Al_2Cu FCC_Al MgZn₂

โครงสร้างที่แข็งตัวในลำดับแรกคือโครงสร้างพื้น α Al ส่วนโครงสร้างยูเทคติกจะเริ่มเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยลำดับแรกคือโครงสร้างยูเทคติกที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม หรือ $\eta(\text{MgZn}_2)$ ตามลำดับแสดงผลในลำดับที่ 3 และหลังจากนั้น โครงสร้างยูเทคติกอื่นๆจะเริ่มเกิดการแข็งตัวเป็นลำดับในลำดับที่ 4, 5, 6 และรวมกันจะมีการเกิด โครงสร้างยูเทคติก คิดเป็นประมาณร้อยละ 15 ของสัดส่วนของแข็งภายหลังการแข็งตัวเสร็จสิ้น ซึ่ง โครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นเป็นโครงสร้างแรกที่ได้จากการคำนวณด้วย Thermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu นี้จะต่างกับที่ได้จากการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงที่ผลของการเกิดโครงสร้างยูเทคติกคิดเป็นแค่ ประมาณร้อยละ 9-11 ของสัดส่วนของแข็งภายหลังการแข็งตัวเสร็จสิ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.6 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs)

นำข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ตำแหน่งต่างๆที่กระจายอยู่แต่ละตำแหน่งของการตรวจสอบเป็นพื้นที่กว้างที่เรียกว่าการทำ Mapping จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ทำให้ทราบลักษณะและปริมาณการเกิดโครงสร้างยูเทคติกดังภาพที่ 4.13 โดยประมาณจากกราฟได้ว่าการเกิดโครงสร้างยูเทคติกคิดเป็นแค่ประมาณร้อยละ 10 ของสัดส่วนของแข็งภายหลังการแข็งตัวเสร็จสิ้น และรูปแบบการแข็งตัวไม่ตรงกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) แบบ Gulliver-Scheil ซึ่งแสดงว่าค่า α ไม่เป็น 0 ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่ความเข้มข้นของธาตุผสมระหว่างการแข็งตัวจากบริเวณที่แข็งตัวแล้ว

ดังนั้นการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับรูปแบบการแข็งตัวของชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง (Al – 9.8Zn – 2.5Mg – 2.3Cu) ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field) ในงานวิจัยนี้ คาดว่าจะมีรูปแบบการแข็งตัวในแบบของ Clyne & Kurz มีความสมดุลของความเข้มข้นในส่วนที่เป็นของเหลวแต่บางส่วนที่แข็งตัวแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและมีการแพร่เกิดขึ้นส่วนที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะสามารถคำนวณหา α ที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวในครั้งนี้ได้จากวิธีการดังนี้

1) คำนวณค่า D_s

โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ 2.7 และเลือกใช้ค่า D_0 คือ $1.77 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ และ Q คือ 117 kJ/mol จากตารางที่ 2.7 ซึ่งพิจารณาว่าธาตุสังกะสี (Zn) เป็นธาตุผสมหลักของโลหะผสมอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ และใช้ค่าอุณหภูมิที่เริ่มการแข็งตัวคือ 630°C หรือ 903 K

$$D_s = 1.77 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{117 \times 10^3}{8.314 \times 630}\right)$$

ได้ค่า D_s เป็น $3.018 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

2) คำนวณค่า L

โดยใช้ค่าครึ่งหนึ่งของขนาดเกรนที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 4.2.2 ซึ่งจะได้ค่า L เป็น 20×10^{-6} m

3) คำนวณค่า t_f

โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการการหาอัตราเร็วในการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงคือ

$$v = \frac{S}{t} \quad (4.1)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

v คือ อัตราเร็วซึ่งในที่นี้ใช้แทนด้วยอัตราเร็วของการหล่อคือ 80 mm/min

S คือ ระยะทางซึ่งในที่นี้ใช้แทนด้วยระยะความลึกที่แตกต่างกันของแอ่งกลางน้ำโลหะหลอมเหลว

หรือ sump depth ของการผลิตแบบ DC. และแบบ LFEC. ขณะทำการหล่อจากภาพที่ 2.2

คือ 50 mm

t คือ เวลาซึ่งในที่นี้ใช้แทนด้วย t_f หน่วยเป็น s

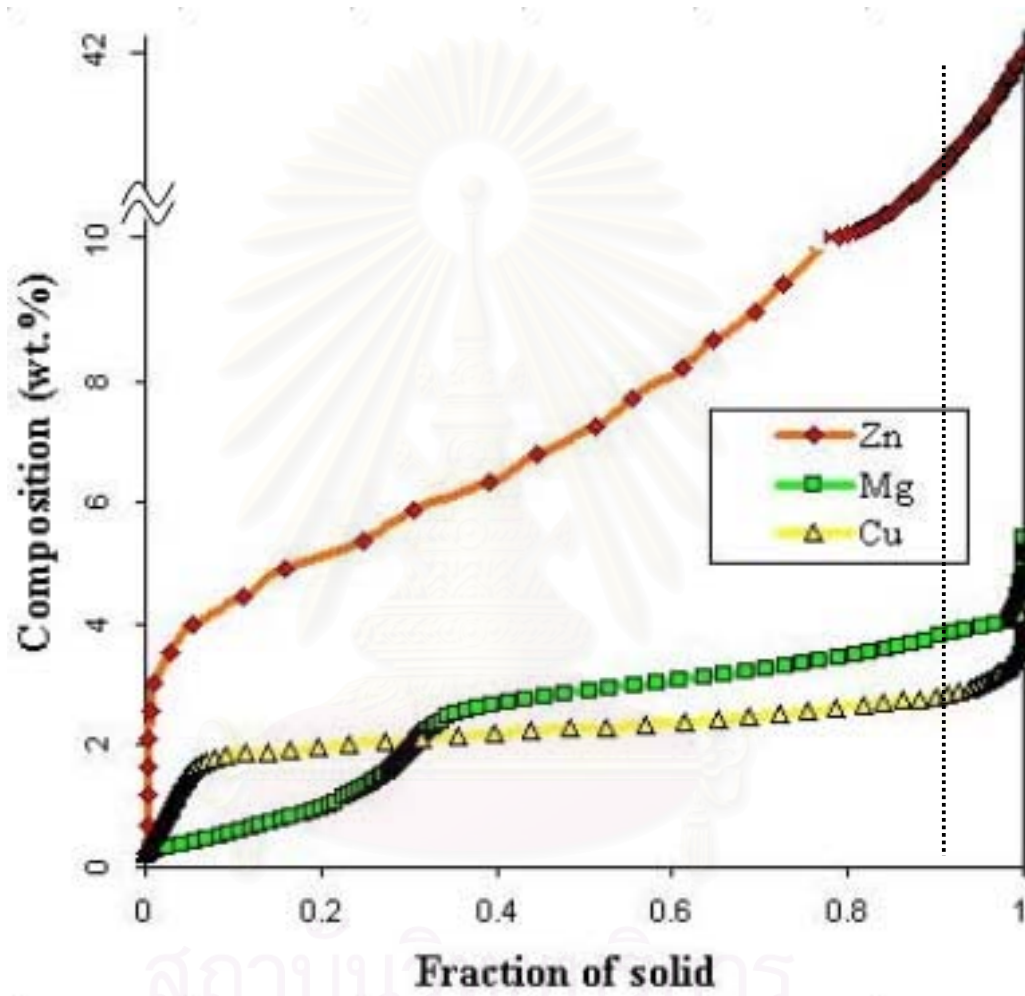
ได้ค่า t_f เป็น 37.5 s

และสามารถคำนวณได้ค่า α โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ 2.10 เมื่อใช้ข้อมูลของค่า D_s เป็น

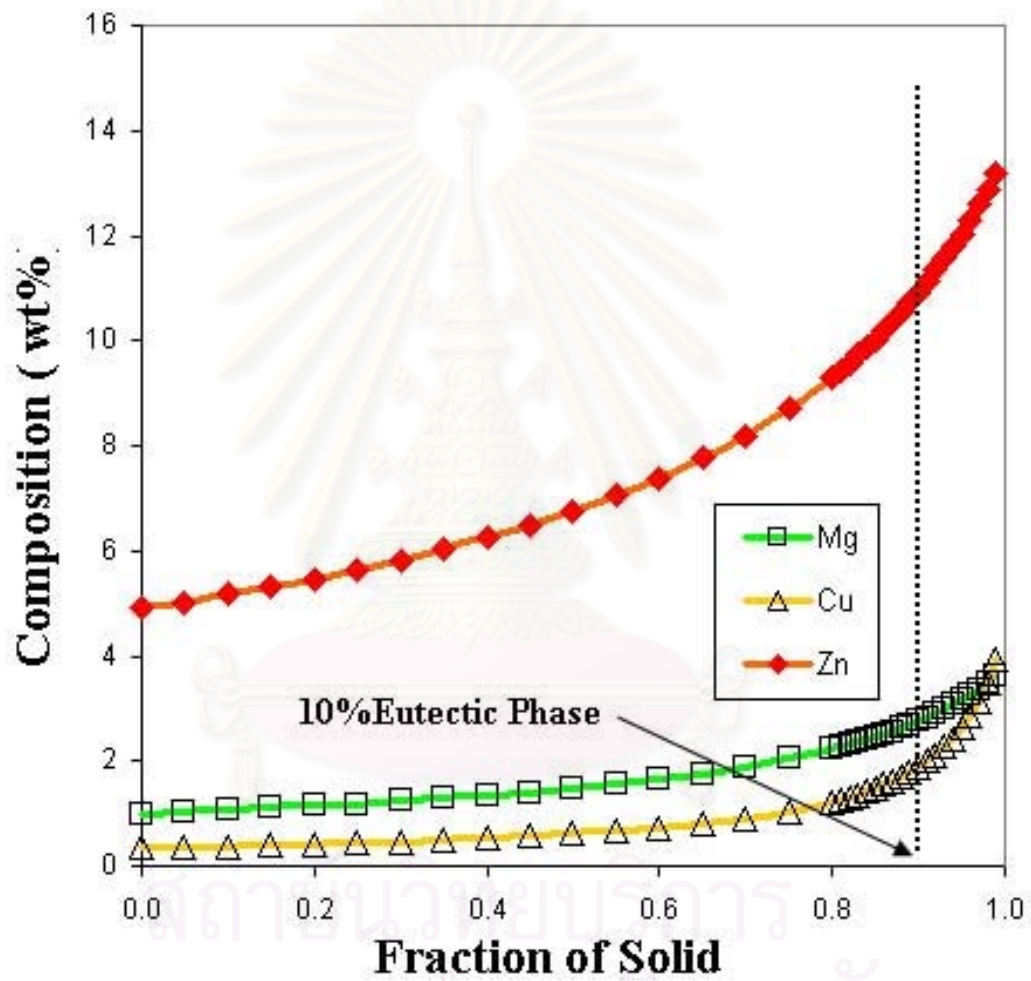
3.018×10^{-12} m²/s, L เป็น 20×10^{-6} m, t_f ระหว่าง 37.5 s

$$\alpha = \frac{D_s \cdot t_f}{L^2} = \frac{3.018 \times 10^{-12} \times 37.5}{(20 \times 10^{-6})^2}$$

คำนวณได้ค่า α คือประมาณ 0.3 และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ดังภาพที่ 4.14 ซึ่งให้ผลคล้ายภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA



ภาพที่ 4.14 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ
(% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ที่ α คิดเป็น
ค่าประมาณคือ 0.3

บทที่ 5

สรุปผลวิจัย

แท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field) ให้ผลที่แตกต่างจากแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field)

1. แท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field) หรือที่จะเรียกโดยย่อว่าวิธีการแบบ LFEC มีขนาดเกรนเล็กละเอียดมากขึ้นและมีการกระจายตัวด้วยขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งแท่งโลหะมากกว่าแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field)
2. แท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field) มีสัดส่วนพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกบริเวณขอบเกรนลดลงเล็กกว่าแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled

(conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field) โดยย่อว่าวิธีการแบบ DC.

โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของโครงสร้างของชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า กับชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) เนื่องจากผลของแรงที่เกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก และแรงที่เกิดขึ้นมานี้จะทำหน้าที่กวนน้ำโลหะหลอมเหลวอยู่ตลอดเวลาในขณะที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งน้ำโลหะบริเวณติดกับผิวขอบแบบหล่อจะเริ่มมีการแข็งตัว ดังนั้นการที่มีแรงมากวนน้ำโลหะนั้น จะส่งผลทำให้บางส่วนของน้ำโลหะบริเวณขอบที่เริ่มมีการแข็งตัวแล้วเกิดการแตกตัวออกเป็นอนุภาคของแข็งเล็กๆ แล้วกระจายตัวไปอยู่ในทุกๆ บริเวณหรือทุกๆ ส่วนของน้ำโลหะหลอมเหลว หลังจากนั้นการแข็งตัวก็เกิดขึ้นต่อไปจากอนุภาคของแข็งเล็กๆ ที่กระจายอยู่ จนการแข็งตัวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยที่ทุกๆ บริเวณของน้ำโลหะหลอมเหลวจะมีลักษณะการแข็งตัวและ ทิศทางการแข็งตัวเกิดขึ้นภายในเวลา, พื้นที่และพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดเกรนที่มีลักษณะขนาดเล็กและรูปร่างกลม กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดจนขนาดความหนาของพื้นที่บริเวณขอบเกรนก็มีค่าน้อย ส่งผลให้ค่าสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของจะมีค่าน้อยตามไปด้วย

ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมเกรนการแข็งตัวของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field) โดยมุ่งเน้นผลการศึกษาเกี่ยวกับเส้นทางการแข็งตัว ตลอดจนชนิด, ลักษณะ และปริมาณการเกิดโครงสร้างยูเทคติกระหว่างแข็งตัว ด้วยการตรวจสอบชิ้นงานจริง กับการคำนวณสมการการแข็งตัวตามทฤษฎีแบบGulliver-Scheil และแบบจำลองการแข็งตัวทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Thermo Calc มีข้อสรุปดังนี้

1. ผลการศึกษาเส้นทางการแข็งตัวเกี่ยวกับลำดับและชนิดของการเกิดโครงสร้างยูเทคติกระหว่างแข็งตัวด้วยการตรวจสอบชิ้นงานจริง กับการคำนวณสมการการแข็งตัวตาม

ทฤษฎีแบบGulliver-Scheil และแบบจำลองการแข็งตัวทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Thermo Calc ให้ผลคล้ายกันคือเกิดการเกิด $\text{Al} + \eta(\text{MgZn}_2)$, $\alpha \text{Al} + \eta(\text{MgZn}_2) + \text{T}(\text{Al-Zn-Mg-Cu})$ และ $\theta(\text{CuAl}_2)$

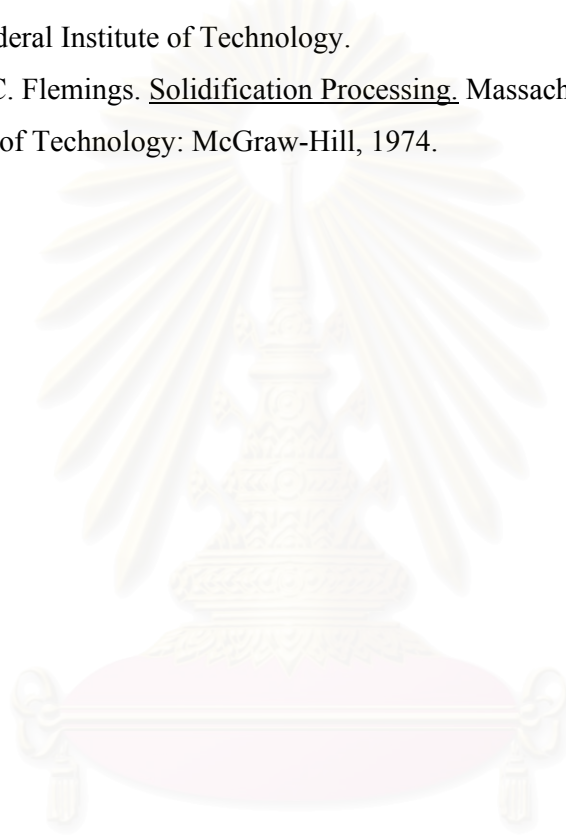
2. ผลการศึกษาเส้นทางการแข็งตัวเกี่ยวกับสัดส่วนความหนาแน่นของ พื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานระหว่างแข็งตัว ด้วยการตรวจสอบชิ้นงานจริงกับการคำนวณสมการการแข็งตัวตามทฤษฎีแบบGulliver-Scheil และแบบจำลองการแข็งตัวทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Thermo Calc ให้ผลต่างกันคือการตรวจสอบชิ้นงานจริงให้ค่าประมาณร้อยละ 9-11 แต่การคำนวณให้ค่าประมาณร้อยละ 15
3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) การตรวจสอบชิ้นงานจริงมีรูปแบบการแข็งตัวไม่ตรงกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) แบบ Gulliver-Scheil ซึ่งแสดงว่าค่า α ไม่เป็น 0 และมีการแพร่ความเข้มข้นของธาตุผสมระหว่างการแข็งตัวจากบริเวณที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งแสดงว่าการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับรูปแบบการแข็งตัวของชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ($\text{Al} - 9.8\text{Zn} - 2.5\text{Mg} - 2.3\text{Cu}$) แบบ Gulliver-Scheil นั้นไม่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] W. Kurz, D.J. Fisher. Fundamentals of Solidification. The Trans tech publications 1992.
- [2] มนต์ สติรจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2538.
- [3] Basant L. Tiwari. Thermodynamic Properties of Al-base Alloys General Motor Research Laboratories.
- [4] Elwin L. Rooy. Aluminum and Aluminum Alloys. Aluminum Company of America.
- [5] Yubo Zuo, Hiromi Nagaumi, Fuxiao Yu, Jianzhong Cui. Effect of low frequency electromagnetic field on the sump and temperature Field during DC casting a super-high strength Al – Zn – Cu alloy
- [6] Yubo Zuo, Jianzhong Cui, Jie Dong, Fuxiao Yu. Effect of low frequency electromagnetic field on the constituents of a new super high strength aluminum alloy. Journal of Alloys and Compound 402 (2005): 149-155.
- [7] Metallographic technique for specific metals and alloys. ASTM Handbook. Edition 10.
- [8] Yubo Zuo, Jianzhong Cui, Zhao Zhihao, Zhang Haitao and Qin Ke. Effect of low frequency electromagnetic field on casting crack during DC casting super high strength aluminum alloy ingots. Materials Science and Engineering A 406 (2005): 286-292.
- [9] Shijie Guo, Qichi Le, Zhao Zhihao, Zhongjun Wang and Jianzhong Cui. Microstructural refinement of DC cast AZ80 Mg billets by low frequency electromagnetic vibration. Materials Science and Engineering 404 (2005): 323-329.
- [10] Takateru Umeda. Microsegregation. The Minerals, Metals & Materials Society, 2001.
- [11] Cyril Stanley Smith and Lester Guttman. Basic concept, symbols and measurements.

- [12] Elwin L. Rooy. Aluminum and Aluminum Alloys. Aluminum Company of America.
- [13] G. Lesoult. Basic Concept in Crystal Growth and Solidification. France: Ecole des Mines de Nancy.
- [14] R. Trivedi and W. Kurz. Solidification of Single-Phase Alloys.
- [15] P. Magnin and W. Kurz. Solidification of Eutectics. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology.
- [16] Merton C. Flemings. Solidification Processing. Massachusetts Institute of Technology: McGraw-Hill, 1974.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล นายเสริมยุทธ แยมเกตุ

วัน-เดือน-ปีเกิด 21 พฤศจิกายน 2521

ที่อยู่ 12/65 ซ.รามคำแหง 174 ถ.สุขาภิบาล 3
แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510

วุฒิการศึกษา ประถมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสาธิตศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร
ปี 2531
ประถมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจิตรลดา ปี 2533
มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสาธิตศรีนครินทรวิโรฒปทุมวัน
ปี 2535
มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา ปี 2537
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2541

โทรศัพท์ติดต่อ 081-812-2386

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย