

พฤติกรรมการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง
ความแข็งแรงสูงมากพิเศษที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้
การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายเสริมยุทธ เข้มเกตุ

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. Sermyut Yamgate

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

490793

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-
ทองแดง ความแข็งแรงสูงมากพิเศษที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อ
เนื่องภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

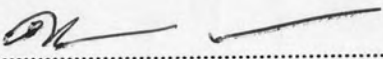
โดย นายเสริมยุทธ เข้มเกตุ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

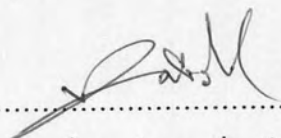
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ ณ อุทธยา

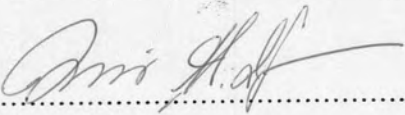
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม Professor Takateru Umeda, D.Eng.

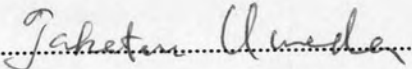
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

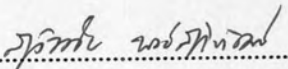

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

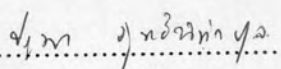
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ ณ อุทธยา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(Professor Takateru Umeda, D.Eng.)


..... กรรมการ
(อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

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

การผลิตชิ้นส่วนงานอะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อใช้ในด้านการขนส่งในปัจจุบันนั้น มีการพัฒนาอะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงสูงมากพิเศษ แต่พบว่ามีข้อจำกัดในการหล่อแท่งโลหะด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Conventional DC casting) ที่เกิดการแตกร้าวภายในแท่งโลหะระหว่างการแข็งตัว จึงทำให้การผลิตเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก การจะป้องกันไม่ให้เกิดการแตกร้าวภายในแท่งโลหะระหว่างการแข็งตัวนั้น ต้องอาศัยการเกิดเกรนที่มีขนาดเล็กละเอียดสม่ำเสมอทั่วแท่งโลหะ ตลอดจนถึงต้องไม่เกิดความเครียดเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกับอุณหภูมิที่ผิวของแท่งโลหะในปริมาณที่สูง ด้วยเหตุนี้การหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ จะช่วยให้เกิดแรงกวนน้ำโลหะตลอดเวลาระหว่างการแข็งตัวจึงส่งผลให้ได้แท่งโลหะที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียดและสม่ำเสมอ 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., 79 pp.

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 สุประดิษฐ ณ อยุธยา และอาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ เป็นอย่างสูงสำหรับการอุทิศงานและสละเวลาอันมีค่าของพวกท่านในการถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจและคำแนะนำต่างๆ ทั้งในด้านการเรียนและการทำงานด้วยความเมตตา ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล เด็ยวณิชย์, คณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ทางด้านโลหะวิทยาในแขนงต่างๆ และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน, ครู ศิริรัตน์ นิสารัตนพร, พี่กิตติพงษ์ อัศววิเศษและเพื่อนๆ กลุ่มวิชาการแข็งตัวของน้ำโลหะที่สละเวลาและแรงงานช่วยเหลือให้การทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนบริษัท Nippon Light Metal Company Ltd.(ประเทศญี่ปุ่น), บริษัท Thai Parkerizing Company Ltd. (ประเทศไทย) และ Mr. M. Ikeda มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่นที่ช่วยเหลือให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์สำหรับการทำงานวิจัย และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและบุคคลอันเป็นที่เคารพรักที่คอยให้กำลังใจอีกทั้งการสนับสนุนทางการศึกษา และให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

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 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค..... | 34 |
| 3.1.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบขนาดเกรนใน โครงสร้างจุลภาค..... | 35 |
| 3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค..... | 36 |
| 3.2.1. กล้องจุลทรรศน์แสง..... | 36 |
| 3.2.2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด, Scanning Electron Microscope (SEM) ตรวจสอบโครงสร้าง ที่กำลังขยายสูงกว่า 1,000เท่า..... | 36 |
| 3.2.3. การวิเคราะห์หาขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้าง ที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค..... | 36 |
| 3.2.4 การคำนวณขนาดเกรนและศึกษาความสัมพันธ์ของ การกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงาน จากผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค..... | 36 |
| 3.2.5 การใช้เครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) ตรวจสอบการกระจายตัวและวิเคราะห์ธาตุผสมในเนื้อโครงสร้าง และวิเคราะห์ธาตุผสมเพื่อระบุสารประกอบของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏ..... | 41 |
| 3.3 การคำนวณเส้นทางและลำดับการแข็งตัวของ โครงสร้างจุลภาค..... | 43 |
| 4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... | 51 |
| 4.1 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค..... | 51 |
| 4.2 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค..... | 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 ที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน | 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 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน โลหะอะลูมิเนียมผสมที่นำมาวิจัย..... | 32 |
| ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบขนาดเกรนของบริเวณผิวชิ้นงาน, บริเวณระหว่างกึ่งกลางกับผิวชิ้นงาน และกึ่งกลาง..... | 55 |
| ตารางที่ 4.2 ขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคของ LFEC บริเวณต่างๆ..... | 61 |
| ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี- แมกนีเซียม (% Composition) กับอุณหภูมิ (T)..... | 66 |

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 กระบวนการหล่อโดยอาศัยแม่เหล็กกวนน้ำโลหะ.....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
กับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน โดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏบนภาพถ่ายโครงสร้าง
จุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดกำลังขยาย 1000 เท่า.....40

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| ภาพที่3.7 ตัวอย่างการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง 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 ผล โครงสร้างจุลภาคของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท DC..... | 52 |
| ภาพที่4.3 ผล โครงสร้างจุลภาคของแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท LFEC..... | 53 |
| ภาพที่4.4 โครงสร้างจุลภาคของLFEC บริเวณต่างๆโดยเริ่มจากซ้ายสุดคือผิวชิ้นงาน..... | 56 |
| ภาพที่4.5 กราฟขนาดเกรนของ โครงสร้างจุลภาคของLFECบริเวณต่างๆ..... | 57 |
| ภาพที่4.6 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเกรน โครงสร้าง จุลภาคของLFEC..... | 58 |
| ภาพที่4.7 กราฟฮิสโทแกรมของขนาดเกรน โครงสร้างจุลภาคของLFEC..... | 59 |
| ภาพที่4.8 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาด สัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของ โครงสร้างจุลภาคของ LFEC..... | 61 |
| ภาพที่4.9 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)..... | 63 |
| ภาพที่4.10 ภาพ โครงสร้างยูเทคติกใน โครงสร้างจุลภาคของLFECที่กำลังขยายสูง..... | 64 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่4.11 ผลเส้นทางการเย็นตัวบนแผนภูมิสมดุล Al-Zn-Mg จากค่าความสัมพันธ์
ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี- แมกนีเซียม (% Composition)
กับ อุณหภูมิ (T) ตามแบบสมการ Gulliver-Scheil's equation.....67

ภาพที่4.12 ผลการคำนวณด้วยThermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu.....68

ภาพที่4.13 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ
(% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs).....72

ภาพที่4.14 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ
(% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ที่ α คิดเป็น
ค่าประมาณคือ 0.373