

โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อและโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว
ของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-10Zn-1~2.5Mg-1~2.3Cu-0.14Zr)
ที่หล่อด้วยกระบวนการ Direct Chill ภายใต้การกวานของแม่เหล็กไฟฟ้า

นางสาวแซวัญ โกสุโข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AS-CAST AND HOMOGENIZED MICROSTRUCTURES OF SUPER HIGH STRENGTH
ALUMINIUM ALLOYS (Al-10Zn-1~2.5Mg-1~2.3Cu-0.14Zr) CAST BY
ELECTROMAGNETICALLY STIRRED DIRECT CHILL CASTING PROCESS

Miss Kaekwan Koesuko

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 2007
Copyright of Chulalongkorn University

501457

แซทวัญ กิติสุข : โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อและโครงสร้างจุลภาคภายหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-10Zn-1~2.5Mg-1~2.3Cu-0.14Zr) ที่หล่อด้วยกระบวนการ Direct Chill ภายใต้การกวนของแม่เหล็กไฟฟ้า. (AS-CAST AND HOMOGENIZED MICROSTRUCTURES OF SUPER HIGH STRENGTH ALUMINIUM ALLOYS (Al-10Zn-1~2.5Mg-1~2.3Cu-0.14Zr) CAST BY ELECTROMAGNETICALLY STIRRED DIRECT CHILL CASTING PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา, อ. ที่ปรึกษา
ร่วม : Prof. Takateru Umeda, D.Eng., 97 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการเกิดสารประกอบของโลหะผสม Al-10Zn-Mg-Cu-Zr ในสภาพหลังการหล่อและหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวโดยชิ้นงานมีขนาด 200 มม.และผ่านการหล่อโดยวิธี Direct Chill โดยมีการกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งชิ้นงานที่นำมาศึกษานี้มีส่วนผสมของสังกะสีคงที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และได้ทำการเปลี่ยนปริมาณแมกนีเซียมที่ 2.5, 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณทองแดงที่ 2.3, 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด ส่วนการวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD), EDX และ EPMA ซึ่งได้ผลดังนี้ โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อที่ส่วนผสม 2.5Mg2.3Cu และ 2.5Mg1.0Cu โครงสร้างที่เกิดขึ้นน่าจะเป็น $Al+ \eta$ ($MgZn_2$) ซึ่งเป็นโครงสร้างแลมเบลยูเทคติกและอาจจะมี T ($Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$) หรือ S (Al_2CuMg) เฟสรวมอยู่ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xigang Fan และ Chandan Mondal แต่ที่ส่วนผสม 2.5Mg1.5Cu, 1.5Mg2.3Cu และ 1.0Mg2.3Cu ไม่สามารถตรวจพบ T ($Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$) และ S (Al_2CuMg) เฟสจากการตรวจสอบด้วยวิธี X-Ray Diffraction นอกจากนี้ยังพบสารประกอบ Al_7Cu_2Fe ในโครงสร้างจุลภาคทุกส่วนผสม และเมื่อปรับปริมาณของทองแดงและแมกนีเซียมลดลงส่งผลให้ปริมาณของยูเทคติกลดลงตามไปด้วย

โครงสร้างชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวพบว่าโครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณลดลงและเริ่มขาดความต่อเนื่องไม่เป็นตาข่าย ส่วนสารประกอบ Al_7Cu_2Fe พบว่ายังคงเหลือค้างในชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต..... *แซทวัญ กิติสุข*
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Ami Hall*
ปีการศึกษา.....2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *Takateru Umeda*


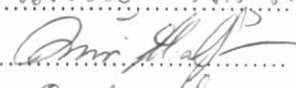
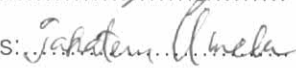
4870649721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD : Al-Zn-Mg-Cu /HOMOGENIZATION / SOLIDIFICATION

KAEKWAN KOESUKO: AS-CAST AND HOMOGENIZED MICROSTRUCTURES OF SUPER HIGH STRENGTH ALUMINIUM ALLOYS (Al-10Zn-1~2.5Mg-1~2.3Cu-0.14Zr) CAST BY ELECTROMAGNETICALLY STIRRED DIRECT CHILL CASTING PROCESS. THESIS ADVISOR: MAWIN SUPRADIST NA AYUDHAYA, Ph.D., THESIS COADVISOR: PROF. TAKATERU UMEDA, D.Eng., 97 pp.

As-cast and homogenized microstructures of Al-10Zn-Mg-Cu-Zr alloys were studied to understand microstructure constituents' formation of super high strength aluminum alloys. Ingot with diameter of 200 mm was cast by low frequency electromagnetic direct chill casting. The Zn content of the sample were 10% and Mg content were 1.0~2.5 wt% and Cu content were 1.0~2.3 wt%. OM and SEM were used for microstructure observation and phase's identification was done by using XRD, EDX and EPMA. Al+ η (MgZn₂) included T (Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ or S (Al₂CuMg) phases in lamellar form of eutectic were found in as-cast microstructure of 2.5Mg2.3Cu and 2.5Mg1.0Cu alloys. T (Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ and S (Al₂CuMg) phases were not detected by X-Ray Diffraction method in 2.5Mg1.5Cu, 1.5Mg2.3Cu and 1.0Mg2.3Cu alloys. Al₇Cu₂Fe phase was found in every alloy compositions. When the amount of Mg and Cu were decreased, the amounts of eutectic phases were also decreased.

For the homogenized samples, the dissolution of the eutectic structures were observed. Al₇Cu₂Fe compound still remained after along homogenization time. Eutectic phases also remained but only a small fraction.

Department:.....Metallurgical Engineering.....Student's:.....
 Field of study:.....Metallurgical Engineering.....Advisor's:.....
 Academic year:.....2007.....Co-advisor's:.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือ จาก
หลายๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Takateru Umeda, อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ
ณ อยุธยา, อาจารย์สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และ ผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร เป็นอย่างสูงสำหรับการอุทิศงานและสละเวลาอันมีค่าของ
พวกท่านในการถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจและคำแนะนำต่างๆ ทั้งในด้าน
การเรียนและการทำงานด้วยความเมตตา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ในงาน
ด้านโลหะวิทยาต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน และเพื่อนในกลุ่ม
วิจัยการแข็งตัวของน้ำโลหะที่สละเวลาแรงงานช่วยเหลือให้การทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและบุคคลอันเป็นที่เคารพรักที่
คอยให้กำลังใจอีกทั้งการสนับสนุนในด้านการศึกษา และให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดี
ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานอะลูมิเนียม.....	8
2.2 ตัวอย่างอิทธิพลของธาตุผสมต่อคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสม.....	10
2.3 แผนภูมิสมดุลสองเฟส และสามเฟสของโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	32
3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย.....	32
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	32
4 ผลการวิเคราะห์การทดลอง.....	41
4.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	41
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคในสภาพหลังการหล่อ.....	41
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	49

บทที่	
4 ผลการวิเคราะห์การทดลอง (ต่อ).....	55
4.2 การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบ.....	55
4.2.1 สารประกอบในสภาพหล่อ.....	56
4.2.2 สารประกอบในสภาพหลังการอบให้เป็นเนื้อเดียว.....	67
4.3 ลำดับการเกิดเฟส.....	76
5 สรุปผลการวิเคราะห์การทดลอง.....	82
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก.....	88
ภาคผนวก ข.....	93
ภาคผนวก ค.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงสัญลักษณ์อะลูมิเนียมหล่อผสม.....	1
ตารางที่ 1.2 แสดงสัญลักษณ์อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น.....	2
ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075.....	3
ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสที่ปรากฏในเฟสไดอะแกรมของโลหะผสม อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-สังกะสี.....	14
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของชิ้นงาน As cast ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบ LFEC (wt %).....	33
ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะที่ใช้ในการหล่อโดยประยุกต์ใช้การกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	33
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบปริมาณยูเทคติกของโลหะผสม อะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสมต่างๆ.....	45
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดเกรนเมื่อปริมาณธาตุผสมเปลี่ยนแปลง.....	48
ตารางที่ 4.3 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณแมกนีเซียม และทองแดงในโลหะหลอมเหลวที่ปริมาณการเกิด มวลของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมดุล Al-Zn-Mg.....	58
ตารางที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณแมกนีเซียมและ ทองแดงในโลหะหลอมเหลวที่ปริมาณการเกิดสัดส่วน ของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมดุล Al-Cu-Mg.....	59
ตารางที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณสังกะสีและ ทองแดงในโลหะหลอมเหลวที่ปริมาณการเกิดสัดส่วน ของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมดุล Al-Zn-Cu.....	61
ตารางที่ 4.6 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณแมกนีเซียมและ ทองแดงในโลหะหลอมเหลวที่ปริมาณการเกิดสัดส่วน ของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมดุล Al-Mg-Cu.....	62
ตารางที่ 4.7 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นในอะลูมิเนียมความแข็งแรง สูงพิเศษที่ส่วนผสมต่างๆ กัน.....	65
ตารางที่ 4.8 แสดงค่า D_0 และค่า Q ของธาตุต่างๆ ในโลหะพื้นอะลูมิเนียม.....	70
ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างแสดงปริมาณธาตุผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสม กลุ่ม 7xxx ที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน.....	88

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างแสดงคุณสมบัติทางกลและลักษณะการใช้งาน ของโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx ที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน.....	92
---	----

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 %Reduction Cold Rolling.....	9
ภาพที่ 2.2 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม – สังกะสี.....	11
ภาพที่ 2.3 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม	12
ภาพที่ 2.4 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม – ทองแดง.....	13
ภาพที่ 2.5 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม – สังกะสี.....	14
ภาพที่ 2.6 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม – ทองแดง – แมกนีเซียม.....	15
ภาพที่ 2.7 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม – ทองแดง – แมกนีเซียม.....	16
ภาพที่ 2.8 แผนภาพแสดงการหล่อแบบ DC Casting.....	17
ภาพที่ 2.9 แผนภาพแสดงการหล่อแบบ LFEC.....	17
ภาพที่ 2.10 ผิวของชิ้นงานหล่อที่มีการประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC) และไม่มีมีการประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (DC).....	18
ภาพที่ 2.11 สารประกอบหลักของโลหะผสมอะลูมิเนียม (Al-9.82Zn-2.35Mg-2.29Cu-0.142Zr wt %) จุด 1, 2 แสดง T เฟส จุด 3 แสดง θ (CuAl ₂) เฟส จุด 4, 5 แสดงโครงสร้างยูเทคติก.....	19
ภาพที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการ Homogenization (a) DC ingot border, (b) DC ingot center, (c) LFEC ingot border and (d) LFEC ingot center	20
ภาพที่ 2.13 (a) DC cast ingot (b) LFEC ingot	21
ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงานระหว่างกระบวนการ LFEC และ DC Casting	21
ภาพที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของ DC และ LFEC ingots: (a และ d) edge (3mm from surface); (b และ e) 1/2 radius; (c และ f) enter; (a–c) DC; (d–f) LFEC.....	22
ภาพที่ 2.16 ผลของ Magnetic Flux Density ที่มีต่อขนาดเกรนโดยเฉลี่ย (ที่กลางชิ้นงาน).....	23
ภาพที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากผลของการเพิ่ม Magnetic Flux Density, (a) 0mT; (b) 17.1mT; (c) 25mT; (d) 32mT; (e) 39.5mT; (f) 46mT	23
ภาพที่ 2.18 ผลของ LFEC ต่อ Fracture Strength และ %Elongation ของชิ้นงาน	24
ภาพที่ 2.19 ผลของ LFEC ต่อความแข็ง (Vickers hardness) ของชิ้นงาน	24

ภาพที่ 2.20	โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากหล่อ จุด a คือ Al-Cu-Fe (Deep gray) และจุด b คือ Al-Zn-Mg-Cu (Shallow gray).....	25
ภาพที่ 2.21	ภาพโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากผ่านการทำ Homogenization ซึ่งถ่ายจาก SEM จุด a คือ Al_7Cu_2Fe จุด b คือ Al-Zn-Mg-Cu compounds.....	26
ภาพที่ 2.22	ภาพโครงสร้างจุลภาคภายหลังจาก Extrusion ซึ่งถ่ายจาก SEM จุด a คือ Al_7Cu_2Fe จุด b คือ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_1$	26
ภาพที่ 2.23	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากทดสอบแรงดึง จุด b คือ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu$	27
ภาพที่ 2.24	แสดงผลของ XRD ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7055 ที่ส่วนผสมต่างๆ กัน alloy A คือ Al-8Zn-2.3Mg-2.6Cu, alloy B คือ A-8Zn-2.0Mg-2.3Cu, alloy C คือ Al-8Zn-1.8Mg-2.0Cu และ alloy D คือ Al-8Zn-1.8Mg-2.0Cu	29
ภาพที่ 2.25	แสดงโครงสร้างในสภาพหล่อ (a) โครงสร้างยูเทคติก (b) สารประกอบ Al_7Cu_2Fe	30
ภาพที่ 2.26	แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบระหว่างการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน (a) 5 นาที, (b) 30 นาที, (c) 6 ชั่วโมง และ (d) 24 ชั่วโมง	30
ภาพที่ 3.1	แผนภาพแสดงกระบวนการหล่อแบบ Direct Chill โดยประยุกต์ใช้การกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	33
ภาพที่ 3.2	แสดงตำแหน่งของชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	34
ภาพที่ 3.3	แสดงรูปชิ้นงานที่นำไปทำการอบให้เป็นเนื้อเดียวและแผนผังกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน.....	34
ภาพที่ 3.4	แสดงภาพตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดเกรน.....	37
ภาพที่ 3.5	แสดงตัวอย่างการคำนวณด้วยโปรแกรม Thermal-Calc. (Al-10Zn-2.5Mg- 2.3Cu wt %)	40
ภาพที่ 4.1	โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ ที่ส่วนผสมต่างๆ กันที่กำลังขยายตัว 50 เท่า ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง n) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ข) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ค) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ง) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu จ) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu.....	42

ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ ส่วนผสมต่างๆ กัน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ก) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ข) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ค) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ง) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu จ) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu.....	43
ภาพที่ 4.3 แสดงโครงสร้างยูเทคติกที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบ ส่องกวาดที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของโลหะอะลูมิเนียม ผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังจากการหล่อ.....	44
ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณยูเทคติกกับปริมาณของแมกนีเซียม และทองแดงที่ผสมในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ.....	45
ภาพที่ 4.5 แสดงขนาดเกรนที่ส่วนผสมต่างๆ กันของโลหะผสมอะลูมิเนียมความ แข็งแรงสูงพิเศษในสภาพหล่อ ก) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ข) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ค) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ง) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu และ จ) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu	47
ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับปริมาณธาตุแมกนีเซียม และทองแดงที่เปลี่ยนแปลง.....	48
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ผ่านการอบให้ เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที	50
ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ที่ผ่านการอบให้เป็น เนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที.....	51
ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ที่ผ่านการอบให้ เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที.....	52
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu ที่ผ่านการอบให้เป็น เนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที	53
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu ที่ผ่านการอบให้เป็น เนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที	55

ภาพที่ 4.12 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นขณะเย็นตัวของระบบแผนภูมิสมดุลง สามเฟสในส่วนผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu, Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu และ Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu (cooling path คำนวณด้วยสมการ Scheil's equation)	56
ภาพที่ 4.13 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นขณะเย็นตัวของระบบแผนภูมิสมดุลง สามเฟสในส่วนผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu, Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu และ Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu	60
ภาพที่ 4.14 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นขณะเย็นตัวของระบบแผนภูมิสมดุลง สามเฟสในส่วนผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu, Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu, Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu, Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu และ Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu ..	63
ภาพที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่ส่วนผสมต่างๆ กันของโลหะผสม อะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ	64
ภาพที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบแนวโน้มปริมาณสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะ ผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษในสภาพหล่อที่ส่วนผสมต่างๆ กัน ก) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณทองแดง ข) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ แมกนีเซียม.....	66
ภาพที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่ส่วนผสมต่างๆ กันของโลหะผสมอะลูมิเนียมความ แข็งแรงสูงพิเศษเมื่อผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C a) สภาพหล่อ, b) 10 นาที, c) 30 นาที, d) 60 นาที, e) 180 นาที b) และ f) 600 นาที	69
ภาพที่ 4.18 แสดงระยะเวลาการแพร่ของธาตุต่างๆ ในโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 460°C (733K)	71
ภาพที่ 4.19 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบชนิดของธาตุผสมในโลหะ ผสมอะลูมิเนียม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ในสภาพหล่อโดยเทคนิค EDX ก) สารประกอบ Al ₇ Cu ₂ Fe ข) Al ₂ Cu	72
ภาพที่ 4.20 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบชนิดของธาตุผสมในโลหะผสม อะลูมิเนียม Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ในสภาพหล่อโดยเทคนิค EDX	72

ภาพที่ 4.21 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบชนิดของธาตุผสมในโลหะผสม
อะลูมิเนียม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังจากอบให้เป็นเนื้อ
เดียวที่อุณหภูมิ 460°C เป็นเวลา 600 นาทีโดยเทคนิค EDX73

ภาพที่ 4.22 แสดงภาพจาก EPMA ของชิ้นงานในสภาพหล่อของโลหะผสม
อะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ ที่ส่วนผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu;
ลูกศร a) แสดงโครงสร้างยูเทคติกที่ขอบเกรน ซึ่งประกอบด้วย $MgZn_2$,
 $T (Al-Zn-Mg-Cu)$, $S (Al_2CuMg)$ และ Al_2Cu , ลูกศร b) สารประกอบ Al_7Cu_2Fe 74

ภาพที่ 4.23 แสดงภาพ EPMA ของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu
ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C ที่เวลา 600 นาที;
ลูกศร a คือ โครงสร้างยูเทคติก ($MgZn_2$ รวมทั้ง Cu, $T (Al_2Zn_3Mg_3$ รวมทั้ง Cu)
และ $S (Al_2CuMg$ รวมทั้ง Zn), ลูกศร b คือ สารประกอบ Al_7Cu_2Fe 75

ภาพที่ 4.24 ก)-จ) แสดงลำดับการเกิดสารประกอบของโลหะผสมอะลูมิเนียม
ที่ส่วนผสมต่างๆ เมื่อโลหะหลอมเหลวเกิดการเย็นตัวโดยการคำนวณ
โดยโปรแกรม Thermo-Calc.79

ภาพที่ ข.1 แสดงตัวอย่างการหาปริมาณยูเทคติกโดยวิธี Point Counting.....93

ภาพที่ ค.1 ความสัมพันธ์ของ Relative intensity ของสารประกอบแต่ละ
ชนิดกับปริมาณของธาตุทองแดงที่เปลี่ยนแปลง.....95

ภาพที่ ค.2 ความสัมพันธ์ของ Relative intensity ของสารประกอบแต่ละ
ชนิดกับปริมาณของธาตุแมกนีเซียมที่เปลี่ยนแปลง.....95