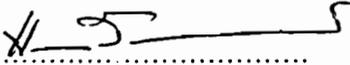


ผลของธาตุผสมปริมาณเล็กน้อยที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหล
ในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083
สำหรับกระบวนการ Thixoforming

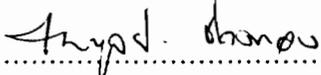
นายทศพร เงินนคร วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

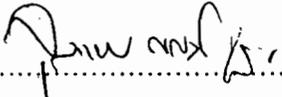
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์


.....
(ดร.ไพบูลย์ ช่วงทอง)

กรรมการ


.....
(ดร.จุลเทพ ขจรไชยกูล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของธาตุผสมปริมาณเล็กน้อยที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 สำหรับกระบวนการ Thixoforming
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายทศพร เงินเนตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลของธาตุผสมปริมาณเล็กน้อยที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 สำหรับกระบวนการ Thixoforming ด้วยการผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 และร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักผสมเพียงธาตุเดียวและผสมทั้งสองธาตุร่วมกันลงในโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวและเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเท การศึกษาผลของเวลาค้างโลหะในสภาพกึ่งของแข็งทำโดยนำโลหะขึ้นต้นให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มลงในน้ำ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะทุกๆส่วนผสมจะเปลี่ยนจากโครงสร้างกิ่งก้านไปสู่โครงสร้างลักษณะกลมและทำให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น การศึกษาผลของธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมที่มีต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งทำโดยนำโลหะขึ้นต้นให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 30 นาที แล้วจุ่มลงในน้ำ พบว่า ธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมไม่มีบทบาทต่อขนาดและความกลมของเกรน การศึกษาผลของธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง ทำโดยการให้ความร้อนกับโลหะขึ้นต้นที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และกดด้วยแรงกดคงที่ (Dead Weight) ขนาด 21.6 นิวตัน เป็นเวลา 10 นาที พบว่าธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมไม่มีบทบาทต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง

คำสำคัญ : โลหะผสม AA5083 / ธาตุผสมปริมาณเล็กน้อย / กระบวนการ Thixoforming

Thesis Title	Effect of Trace Elements on Microstructure and Rheological Behavior in Semi-solid State of Al-Mg Alloys Grade AA5083 for Thixoforming Process
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Tasaporn Ngermnate
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chaowalit Limmaneevichitr
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metallurgical Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

Abstract

This study aimed to study the effect of trace elements on microstructure and rheological behavior in semi-solid state of Al-Mg alloys grade AA5083 for Thixoforming process. The experiments were added zirconium 0.04 and 0.08 percent by weight, strontium 0.02 and 0.04 percent by weight; separately and combine to Al-Mg alloys grade AA5083 and feed stock manufacturing with the cooling slope. For to study the effect of isothermal holding time on microstructure; reheat the billets to semi-solid state at 610°C with 15, 30, 45 minute holding time and quench. The result show; dendritic structure transformed to globular structure and coarse structure with long holding time. For to study the effect of trace elements on microstructure; reheat the billets to semi-solid state at 610°C with 30 minute holding time and quench. The result show; small amount of zirconium and strontium have not effect on microstructure; shape and size of alloys. For rheological test; reheat the billets to semi-solid state at 610°C and compress with 21.6 N dead-weight with 10 minute holding time. The result show; small amount of zirconium and strontium have not effect on rheological behavior in semi-solid state of alloys.

Keywords : Al-Mg alloys AA5083 / Trace Elements / Thixoforming Process

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เชาวลิต ลีम्मณีวิจิตร อาจารย์ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำแนะนำสั่งสอนต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัย การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ การแก้ไขปัญหาต่างๆ การเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนเป็นแบบอย่างให้แก่ผู้เขียนจนมีความรู้ความสามารถทางด้านโลหะวิทยาจนสามารถทำงานวิจัยจนสำเร็จได้ในที่สุด ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆท่านที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ ให้ความสามารถ ให้ปัญญาและให้การศึกษาแก่ผู้เขียน ขอขอบคุณ คุณรุ่งกัจจร รวณาไพโร จากบริษัท ไดเทคนิคเอไอไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์โลหะแม่อะลูมิเนียมแมงกานีส (Al75Mn) และโลหะแม่อะลูมิเนียมสตรอนเชียม (Al10Sr) ที่ใช้สำหรับงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณมนต์ชัย ลลิตอุไร จากบริษัท เคนโซวีล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วิเคราะห์ข้อมูลสัดส่วนการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนๆวิศวกรมโลหะกรรมโลหการทุกๆท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน เป็นอย่างดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดามารดาที่เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและครอบครัวที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การสนับสนุนทางการศึกษาจนสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและหลักการของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมกลุ่มรีด	5
2.2 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification)	5
2.2.1 กระบวนการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกัน	7
2.2.2 กระบวนการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน	9
2.2.3 กระบวนการเกิดนิวเคลียสจากการสัมผัสเย็น	11
2.2.4 กลไกการเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะไม่เป็นกึ่งก้อน	13
2.3 การเกิดโครงสร้างขณะทำให้เกิดการหลอมละลายบางส่วนและค้ำโลหะที่ อุณหภูมิคงที่	15
2.4 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง	19
2.5 วิธีเตรียมโลหะขั้นต้น (feed stock) สำหรับกระบวนการ Thixoforming	23
2.5.1 การกวนโลหะขณะแข็งตัวด้วยวิธีกล	23
2.5.2 การกวนโลหะขณะแข็งตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	23

2.5.3 การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ	23
2.5.4 การปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยการเติมธาตุผสม	24
2.5.5 การสร้างความเครียดเพื่อช่วยให้หลอมละลาย	24
2.5.6 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเท	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	34
3.1 การเตรียมโลหะหลัก	34
3.2 การทดลอง	36
3.2.1 การเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเท	36
3.2.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง	38
3.2.3 การศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง	40
3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	41
3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค	41
3.3.2 วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง	44
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	45
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค EDS Mapping	45
4.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน	46
4.3 ผลของเวลาค้างโลหะที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง	48
4.3.1 ระดับความกลมของเกรน	50
4.3.2 ขนาดเกรน	51
4.4 ผลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง	51
4.4.1 ผลของธาตุเซอร์โคเนียม	51
4.4.2 ผลของธาตุสตรอนเชียม	53
4.4.3 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียม ในปริมาณต่างๆ	54
4.4.4 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียม ในปริมาณต่างๆ	56
4.5 ผลของธาตุผสมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง	57

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการทดลอง	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	65
ก ขนาดเกรนมาตรฐาน ASTM E112-96	65
ข ส่วนผสมของโลหะขึ้นต้น	67
ค ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis:DTA	69
ประวัติผู้วิจัย	71

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างๆ จากการหล่อด้วยวิธีต่างๆ	21
2.2 เปรียบเทียบลักษณะของชิ้นส่วนยานยนต์ ที่ผลิตด้วยวิธีต่างๆ	21
3.1 ส่วนผสมตามมาตรฐานของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด AA5083	34
3.2 ส่วนผสมของโลหะหลัก เกรด AA5083 ที่ได้จากการเตรียม	35
3.3 ส่วนผสมของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์	35
3.4 ส่วนผสมของโลหะขึ้นต้น	39
4.1 อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการแข็งตัวของโลหะผสมต่างๆ	47
ก.1 ขนาดเกรนมาตรฐาน ASTM E112-96	66
ข.1 ส่วนผสมของโลหะขึ้นต้น	68

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (ก) เริ่มเกิดการฟอร์ม Nuclei (ข) Nuclei เริ่มโตขึ้น เป็นผลึก (ค) ผลึกโตมาชนกันเป็นเกรนและบริเวณเชื่อมต่อกันระหว่างเกรนเรียกว่า ขอบเกรน	6
2.2 พลังงานอิสระของของแข็งและของเหลว	7
2.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในการนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกันของทรงกลมรัศมี r	9
2.4 นิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน	9
2.5 เปรียบเทียบพลังงานอิสระของระบบนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกันและนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน	11
2.6 แบบจำลองการเกิด Thermal Convection และการเคลื่อนที่ของเดนไดรท์จากบริเวณผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ	12
2.7 แบบจำลองการหลอมละลายของเดนไดรท์เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว	12
2.8 กลไกการแตกหักของแขนของโครงสร้างกิ่งก้าน (ก) โครงสร้างกิ่งก้านสภาพปกติ (ข) แขนของโครงสร้างกิ่งก้านเกิดการตัดงอ (ค) แขนโครงสร้างกิ่งก้านที่ตัดงอมีมุมเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีผลึกใหม่เกิดขึ้น (ง) แขนของโครงสร้างกิ่งก้านหลุดออกจากขอบเกรน	13
2.9 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างกิ่งก้านเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นคอก กุหลาบและเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมภายใต้แรงกระทำที่มีอัตราเร็วเพิ่มขึ้น และการไหลลักษณะปั่นป่วนที่รุนแรง	14
2.10 การทดสอบตัด Slurry ด้วยมีด	15
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคเฟสของแข็งกับเวลาดังโลหะ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส (สัดส่วนของแข็ง 0.45) ของโลหะผสม A357 ที่เตรียม โลหะขึ้นต้นด้วยวิธีหล่อแบบเดิม (Conventional) โครงสร้างก่อนให้ความร้อนมีลักษณะกลม (O) และเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี MHD Stirling โครงสร้างก่อนให้ความร้อนมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน (O)	17
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของเกรน (Solid Shape Factor : Fg) กับเวลาดังโลหะ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส (สัดส่วนของแข็ง 0.50) ของโลหะผสม A357 ที่เตรียม โลหะขึ้นต้นด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่อง (I) ไม่ปรับสภาพเกรนละเอียด (m) ปรับสภาพเกรนละเอียดและวิธี MHD Stirling (n)	17

2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับเวลาดำ โลหะเมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส (สัดส่วนของแข็ง 0.50) ของโลหะผสม A357 ที่เตรียม โลหะขึ้นต้นด้วยวิธี MHD Stirring	18
2.14	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 2014 เมื่อเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี RAP นำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่ อุณหภูมิ 625 องศาเซลเซียส ในเตาเกลือแล้วค้างโลหะเป็นเวลา (ก) 3 นาที (ข) 5 นาที (ค) 10 นาที (ง) 30 นาที	18
2.15	ขนาดเกรนและ Shape factor ในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ เมื่อเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี RAP และ Cooling Slope:CS	19
2.16	เปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมที่ผลิตจากกระบวนการต่างกัน (ก) โครงสร้างแบบกิ่งก้านจากการหล่อแบบเดิม (ข) โครงสร้างลักษณะกลมจากการ ผลิตในสภาพกึ่งของแข็ง	20
2.17	ช่วงอุณหภูมิในการเตรียม Slurry จากของเหลวสำหรับกระบวนการ Rheocasting และการเตรียม Slurry จากการ Reheat จากสภาพของแข็งสู่สภาพกึ่งของแข็งสำหรับ กระบวนการ Thixoforming	22
2.18	การเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเท (Cooling Slope)	25
2.19	เปรียบเทียบลักษณะเกรนของโลหะผสม AA5083 ที่ได้จากการเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วย วิธีต่างๆ แล้วให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ เป็นเวลา 30 นาที แล้วจุ่มน้ำ (ก) การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเท (ข) การเทโลหะ หลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ	25
2.20	โครงสร้างเกรนในสภาพหล่อของโลหะผสม (ก) Al-5.0%Mg (ข) Al-5.0%Mg-0.1%Zr	26
2.21	โครงสร้างเกรนในสภาพรีดร้อนภายหลังอบให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันของ โลหะผสม (ก) Al-5.0%Mg โครงสร้าง Equiaxed (ข) Al-5.0%Mg-0.1%Zr โครงสร้าง เส้นใยผสมโครงสร้าง Equiaxed	26
2.22	อุปกรณ์ทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง	27
2.23	ลักษณะโลหะผสม A356 ที่ผ่านการทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง (ก) A356 (ข) A356 refined with Ti-B (ค) A356 over-refined	27
2.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลาคดของการทดสอบพฤติกรรมการไหล ในสภาพกึ่งของแข็ง ของโลหะผสม A356	27
2.25	การเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเทสำหรับกระบวนการ Thixoforming	28

2.26	ผลของอุณหภูมิและความยาวรังสีที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งเมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 570, 580 และ 590 องศาเซลเซียส แล้วจุ่มน้ำของโลหะผสม A356	29
2.27	โครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SAED ของโลหะผสม Al-3.0%Mg-0.2%Zr ที่ได้จากระบวนการ ECAP	30
2.28	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดเกรนของโลหะผสมต่างๆ	30
2.29	ผลของธาตุ Sr ในโลหะผสม Al-5.5%Mg ที่ทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่างๆ	31
2.30	ผลการวิเคราะห์ขอบเกรนของผิวหน้าบริเวณแตกร้าวโดยใช้เทคนิค Auger Electron Spectroscopy ในโลหะผสม Al-5.5%Mg เมื่อผสม Sr 10 ppm	31
2.31	ผลของไทเทเนียมที่มีต่ออุณหภูมิเริ่มแข็งตัวของโลหะผสม A356	32
2.32	ผลของสตรอนเชียมที่มีต่ออุณหภูมิเยือกติดของโลหะผสม A356	33
2.33	โครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งเมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 598 องศาเซลเซียส แล้วจุ่มในน้ำ (ก) A356 (ข) A356 ผสมไทเทเนียม 520 ppm และโบรอน 73 ppm (ค) A356 ผสมสตรอนเชียม 156 ppm	33
3.1	อุปกรณ์เตรียมโลหะขึ้นต้น	37
3.2	(ก) ลักษณะโลหะขึ้นต้นเมื่อถอดจากโมลด์ (ข) ขนาดโลหะขึ้นต้นสำหรับทดลอง	38
3.3	การทดสอบตัดโลหะผสม AA5083 เมื่อผ่านการให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส เวลาค้างโลหะที่ (ก) 15 นาที (ข) 30 นาที	39
3.4	ลักษณะขึ้นทดสอบของโลหะผสม AA5083 ที่ผ่านการขึ้นรูปในสภาพกึ่งของแข็ง	40
3.5	ลักษณะอุปกรณ์ทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง	41
3.6	(ก) แบบเส้นมาตรฐานของการวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept (ข) ตัวอย่างการวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept	43
4.1	EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก	45
4.2	EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก	45
4.3	EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก	46
4.4	EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก	46

4.5 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของ โลหะผสม AA5083	47
4.6 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของ โลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก	47
4.7 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของ โลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก	48
4.8 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของ โลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุ สตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก	48
4.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมต่างๆ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มในน้ำ	49
4.10 ความกลมเกลี้ยงของเกรนของโลหะผสมต่างๆ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่ อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มในน้ำ	50
4.11 ขนาดเกรนเกลี้ยงของโลหะผสมต่างๆ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่ อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มในน้ำ	51
4.12 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ (ก) 0.00%Zr (ข) 0.04%Zr (ค) 0.08%Zr	52
4.13 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมต่อระดับความกลมเกลี้ยงของเกรน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ	52
4.14 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ	53
4.15 ผลของธาตุสตรอนเชียมต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ (ก) 0.00%Sr (ข) 0.02%Sr (ค) 0.04%Sr	53
4.16 ผลของธาตุสตรอนเชียมต่อระดับความกลมเกลี้ยงของเกรนเมื่อให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ	54
4.17 ผลของธาตุสตรอนเชียมต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ	54
4.18 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมในปริมาณ ต่างๆ ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ (ก) 0.00%Sr (ข) 0.02%Sr (ค) 0.04%Sr	55

- 4.19 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมในปริมาณ 55
ต่างๆ ต่อความกลมเกลี้ยงของเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส
ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ
- 4.20 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมในปริมาณ 56
ต่างๆ ต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที
แล้วจุ่มในน้ำ
- 4.21 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมในปริมาณ 56
ต่างๆ ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส
ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ
- 4.22 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมในปริมาณ 57
ต่างๆ ต่อความกลมเกลี้ยงของเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส
ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ
- 4.23 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียม ในปริมาณ 57
ต่างๆ ต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที
แล้วจุ่มในน้ำ
- 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลาให้แรงกดคงที่ 58
- ค.1 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083 70
- ค.2 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสม 70
ธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก
- ค.3 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสม 70
ธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก
- ค.4 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุ 70
เซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก

รายการสัญลักษณ์

T_m	=	อุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลว
G^L	=	พลังงานอิสระของของเหลว
G^S	=	พลังงานอิสระของของแข็ง
T	=	อุณหภูมิ
ΔG	=	ความแตกต่างระหว่างพลังงานอิสระ
ΔT	=	ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแข็งตัวกับจุดหลอมเหลว
L	=	ความร้อนแฝงจำเพาะ
r^*	=	รัศมีนิวเคลียส
γ_{ML}	=	แรงตึงผิวระหว่างแบบหล่อกับของเหลว
γ_{SL}	=	แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว
γ_{SM}	=	แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับแบบหล่อ
A_{SL}	=	พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลว
A_{SM}	=	พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับแบบหล่อ
V_S	=	เมื่อปริมาตรของ Embryo ที่มีรูปร่างเป็นเส้นของวงกลม
N_v	=	ค่าเฉลี่ยของจุดตัดที่คำนวณได้จากเส้นตรง 3 เส้น
n_n	=	จำนวนจุดตัดที่เกิดขึ้นบนเส้นแนวตั้งฉาก
n_1	=	จำนวนจุดตัดที่เกิดขึ้นบนเส้นขนานนอน
n_2	=	จำนวนจุดตัดที่เกิดขึ้นบนเส้นทแยงมุมทั้ง 2 เส้น
A_α	=	พื้นที่ของเกรนอัลฟาอะลูมิเนียม
E	=	ความเครียด
H	=	ระยะความสูงที่เหลือของแท่งโลหะขึ้นต้น
H_0	=	ระยะความสูงของแท่งโลหะขึ้นต้นก่อนกดด้วยแรงคงที่

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและหลักการของงานวิจัย

ปัจจุบันโลหะอะลูมิเนียมผสมถูกนำมาใช้งานมากขึ้นเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา สัดส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จึงช่วยลดน้ำหนักชิ้นส่วนต่างๆ โดยเฉพาะยานพาหนะ ซึ่งจะช่วยลดความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีราคาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน สามารถทำการเชื่อมและขึ้นรูปได้ดี โลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม AA5XXX เป็นโลหะกลุ่มรีดที่นิยมนำมาใช้งานอีกกลุ่มหนึ่ง โลหะกลุ่มนี้มีแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลัก ซึ่งมีปริมาณของแมกนีเซียมผสมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลไม่สามารถทำได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนแต่สามารถทำได้ด้วยการขึ้นรูปเย็นและการเติมธาตุผสม มีความแข็งแรงอยู่ในระดับปานกลาง มีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน การเชื่อมประกอบและขึ้นรูปได้ดี ตัวอย่างการนำไปใช้งาน ได้แก่ ถังบรรจุก๊าซปิโตรเลียมเหลว ชิ้นส่วนที่สัมผัสน้ำทะเล ฝากระป๋องบรรจุอาหาร และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น [1]

กระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Processing :SSM) แบ่งได้ 2 วิธี คือ Rheocasting และ Thixoforming โลหะที่อยู่ระหว่างการผลิตจะมีองค์ประกอบของเฟสของเหลวร่วมกับเฟสของแข็ง เรียกว่า “Slurry” การเตรียม Slurry เพื่อให้ได้โครงสร้างไม่เป็นกิ่งก้าน (Non-Dendritic or Globular) มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอสำหรับกระบวนการ Rheocasting จะเตรียม Slurry จากของเหลวโดยตรงแล้วป้อนโลหะเข้าโมลด์ในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป ส่วนของกระบวนการ Thixoforming การเตรียม Slurry จะได้จากการให้ความร้อน (Reheat) โลหะขึ้นต้น (Feed Stock) จากสภาพของแข็งสู่สภาพกึ่งของแข็งเพื่อให้ได้โครงสร้างลักษณะกลม แล้วป้อนโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป ชิ้นส่วนที่ได้จากการผลิตจะมีโครงสร้างเกรนลักษณะค่อนข้างกลม รูพรุนและการหดตัวเกิดขึ้นต่ำกว่าการหล่อหลอมด้วยวิธีทั่วไป ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่า สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีกว่า การขึ้นรูปโลหะในสภาพของแข็ง ชิ้นส่วนที่ผลิตได้สามารถนำไปเชื่อมประกอบด้วยกระบวนการเชื่อม LASER, MIG หรือ TIG ได้ ชิ้นส่วนที่มีขนาดใกล้เคียงหรือเท่ากับขนาดที่ต้องการจึงช่วยลดขั้นตอนการผลิต [2] ทำให้ลดต้นทุนการผลิตลงได้ จากข้อดีดังกล่าวกระบวนการนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง สำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการคุณสมบัติทางกลสูง โดยเฉพาะโลหะอะลูมิเนียมผสม

โลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง จะต้องมีช่วงอุณหภูมิของการแข็งตัว (Solidification Range) ที่กว้างพอ เพื่อรักษาสภาพกึ่งของแข็งในระหว่างกระบวนการผลิต เพราะเมื่อ

อุณหภูมิลดลงจะทำให้ปริมาณสัดส่วนของของแข็ง (Solid Fraction) เพิ่มขึ้น จะไม่สามารถไหลตัวเข้าในโมลด์ โดยเฉพาะบริเวณที่ซับซ้อน หรือได้โครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางกลต่ำลง จึงมีหลายๆงานวิจัยที่กระทำกับโลหะอะลูมิเนียมผสมที่นิยมใช้ ในกลุ่มหล่อ เช่น เกรด 356, 319 และ 390 สำหรับกลุ่มรีด เช่น เกรด 2XXX และ 7XXX เพื่อให้ได้โลหะที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง ด้วยการใส่ธาตุผสมซึ่งเป็นธาตุที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ทั้งการดัดแปลงโครงสร้างด้วยสตรอนเซียม การปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยไทเทเนียมและโบรอน และธาตุอื่น เช่น เซอร์โคเนียม สแกนเดียม เป็นต้น ดังนั้นหากนำธาตุเหล่านี้ไปใช้กับโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรดอื่นๆ แล้วได้โลหะที่มีคุณสมบัติเหมาะสม จึงเป็นการช่วยเพิ่มทางเลือกชนิดโลหะสำหรับกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง หลายๆงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาผลของธาตุเซอร์โคเนียมในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม ในกระบวนการผลิตแบบเดิมทั้งกระบวนการหล่อหลอมและกระบวนการขึ้นรูปในสภาพของแข็งซึ่งพบว่าธาตุเซอร์โคเนียมทำให้เกิดอนุภาค Al_3Zr ซึ่งทำหน้าที่ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส ในโลหะหลอมเหลวที่กำลังแข็งตัวจึงทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงและยังขัดขวางการเติบโตของเกรนในขณะให้ความร้อนอีกด้วย [3] ซึ่งผลของธาตุเซอร์โคเนียมสำหรับกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็งยังไม่มีการศึกษา สำหรับผลของธาตุสตรอนเซียมในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมมีการศึกษากันน้อยมาก แต่ในกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็งยังไม่มีการศึกษาเช่นเดียวกัน ซึ่งธาตุสตรอนเซียมนี้ได้มีการศึกษาในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 พบว่าช่วยทำให้เกรนมีความกลมเพิ่มขึ้นและมีขนาดเล็กลงและยังเพิ่มพฤติกรรมไหลเมื่ออยู่ในสภาพกึ่งของแข็งอีกด้วย [4] ซึ่งโลหะที่อยู่ในสภาพกึ่งของแข็งหรือเรียกว่า Slurry สำหรับกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็งต้องการให้เฟสของแข็งมีลักษณะกลม ขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอในเฟสของเหลวเพื่อให้สามารถเข้าเต็มเต็มในแม่พิมพ์ได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 ซึ่งจัดอยู่ในโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม AA5XXX และมีคุณสมบัติดังกล่าวมาแล้วในตอนต้น โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 นี้ในปัจจุบันถูกนำไปใช้งานแพร่หลาย เช่น ชิ้นส่วนเรือเดินทะเล ถึงแรงดันสูง ชิ้นส่วนตัวถังและแผ่นเสริมตัวถังของรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้ ต้องผ่านการขึ้นรูปและเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน จึงเห็นได้ว่าโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 มีจุดสนใจต่อการศึกษาศึกษาสำหรับการขึ้นรูปในสภาพกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ Thixoforming ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของธาตุเซอร์โคเนียมและสตรอนเซียมเมื่อผสมในปริมาณเล็กน้อย ที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมไหล (Rheological Behavior) เมื่ออยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของธาตุผสมในปริมาณเล็กน้อยที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 สำหรับกระบวนการ Thixoforming

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของธาตุผสมเมื่อผสมในปริมาณเล็กน้อยที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 สำหรับกระบวนการ Thixoforming โดยการผสมโลหะแม่ Al10Zr และโลหะแม่ Al10Sr ปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมที่ผสมนำมาจากผลงานของชานนท์ [5] ที่ทำการศึกษการปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยธาตุสแกนเดียมและธาตุเซอร์โคเนียม สำหรับงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 พบว่าเมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมในช่วงร้อยละ 0.05 ถึงร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง และขนาดเกรนที่ได้ยังมีความละเอียดมากขึ้นตามปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดใช้ธาตุเซอร์โคเนียมที่ส่วนผสมร้อยละ 0.04 และร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ธาตุสตรอนเชียมปกติใช้ในการตัดแปลงโครงสร้างยูเทคติกซิลิกอนของโลหะผสมไฮโปยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เช่น เกรด A356 ซึ่งจะให้อยู่ในช่วงร้อยละ 0.008 ถึงร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก [6] งานวิจัยนี้ใช้ธาตุสตรอนเชียมที่ร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ขนาดรางเท (Cooling Slope) นำมาจากผลงานของ Haga และ Kapranosb [7] ที่ได้ทำการศึกษการเตรียมโลหะขึ้นต้น (Feed Stock) สำหรับกระบวนการ Thixoforming โดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 ด้วยรางเทที่มีขนาดความยาว 150 และ 250 มิลลิเมตร มุมเอียง 60 องศา เทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 630 และ 650 องศาเซลเซียส แล้วนำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการโลหะเทที่อุณหภูมิต่ำกว่าทำให้ขนาดเกรนเล็กกว่า และโครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิมีความกลมมากกว่า และเมื่อใช้รางเทที่มีความยาวมากกว่าจะได้โครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความหนาแน่นมากกว่า เมื่อทำการทดลองในเบื้องต้นเพื่อหาอุณหภูมิเทและขนาดรางเทของงานวิจัยซึ่งสามารถเทโลหะด้วยอุณหภูมิต่ำสุดได้ที่ 650 องศาเซลเซียส และรางเทที่มีความยาว 450 มิลลิเมตร มุมเอียง 60 องศา การศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งเนื่องจากโลหะผสม AA5083 มีอุณหภูมิช่วงของการแข็งตัวระหว่าง 574 ถึง 638 องศาเซลเซียส [8] เมื่อทำการทดลองในเบื้องต้นเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาค้างโลหะในสภาพกึ่งของแข็งและพบว่าที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และเวลาค้างโลหะ 30 นาที สามารถทดสอบตัด (Cut Test) โลหะขึ้นต้นได้ จึงกำหนดที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และเวลาค้างโลหะที่ 15, 30 และ 45 นาที และการศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งกำหนดที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน สำหรับเวลาและขนาดแรงกดนำมาจากผลงานของ Nafisi และคณะ [4] ที่ทำการศึกษการปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยการเติมไทเทเนียมและ

โบรอน(A15Ti1B) และดัดแปลงโครงสร้างด้วยสตรอนเชียม (A110Sr) ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหล (Rheological Behavior) ในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 โดยใช้แรงกดคงที่ขนาด 21.6 นิวตัน เป็นเวลา 10 นาที ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1. ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 และ 0.08 โดยน้ำหนัก ผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และ 0.04 โดยน้ำหนัก ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และ 0.04 โดยน้ำหนัก ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 ร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และ 0.04 โดยน้ำหนัก ในอะลูมิเนียมหล่อและเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเทขนาดความยาว 450 มิลลิเมตร มุมเอียง 60 องศา ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสลงในโมลด์เหล็กกล้า
2. ศึกษาผลของเวลาดำโลหะในสภาพกึ่งของแข็งที่มีต่อความกลมของเกรนและขนาดเกรน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และเวลาดำโลหะ 15, 30 และ 45 นาที
3. ศึกษาผลของธาตุเซอร์โคเนียมและสตรอนเชียมที่มีต่อความกลมของเกรนและขนาดเกรนในสภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส เวลาดำโลหะ 30 นาที
4. ศึกษาผลของธาตุเซอร์โคเนียมและสตรอนเชียมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส กดด้วยแรงคงที่ขนาด 21.6 นิวตัน เป็นเวลา 10 นาที
5. วิเคราะห์ความกลมของเกรนด้วยค่า Shape Factor และขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept ตามมาตรฐาน ASTM E112-96 โดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ
6. วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งด้วยกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลาให้แรงกดคงที่

1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

ทราบผลของธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมเมื่อผสมในปริมาณเล็กน้อยที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด AA5083 สำหรับกระบวนการ Thixoforming และนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อพัฒนาโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมสำหรับกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็งต่อไป

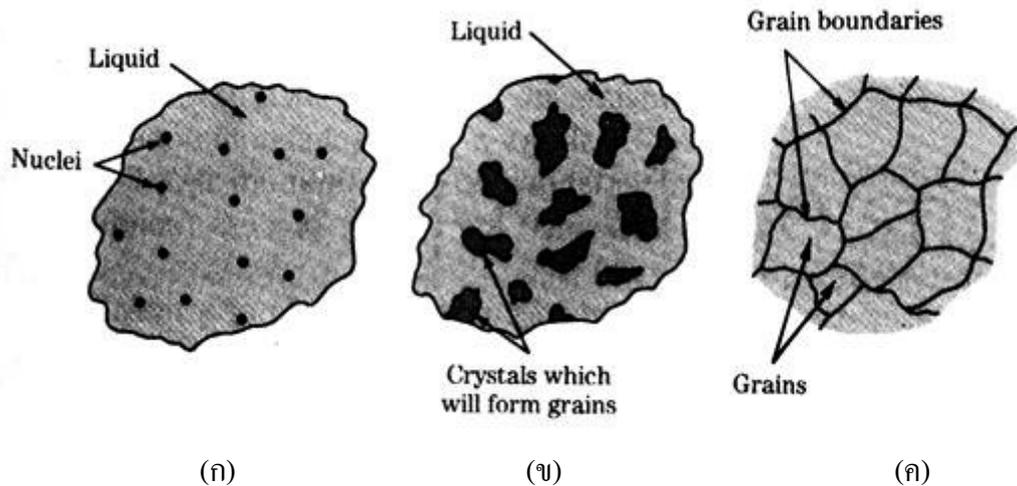
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมกลุ่มรีด

โลหะอะลูมิเนียมผสมมีบทบาทมากในอุตสาหกรรม เพราะนอกจากจะมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ต้านทานต่อการกัดกร่อน ความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักสูง แล้วยังเป็นโลหะที่มีสมบัติทางด้านการหล่อลอมดีและมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม ในกลุ่มรีด (Wrought Alloys) จะมีแมกนีเซียมผสมระหว่างร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมสามารถละลายได้สูงสุดที่ร้อยละ 14.9 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 452 องศาเซลเซียส และจะสามารถละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง โลหะผสมชนิดนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยผลของการขึ้นรูปเย็นและการเติมธาตุผสม มีความแข็งแรงสูงปานกลาง มีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน การเชื่อมประกอบและขึ้นรูปได้ดี [1] เช่น โลหะผสมเกรด AA5083 (4.0-4.9%Mg) นิยมใช้ทำชิ้นส่วนเรือเดินทะเล ถึงแรงดันสูง ชิ้นส่วนตัวถังและแผ่นเสริมตัวถังของรถยนต์ เป็นต้น

2.2 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification)

โลหะหลอมเหลวหรืออยู่ในสภาวะหลอมละลายเนื่องจากการได้รับความร้อนทำให้อะตอมของโลหะที่อยู่ในของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบและมีพลังงานอิสระที่ระดับต่ำเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นทำให้อะตอมของโลหะเกิดการสั่นสะเทือนและมากขึ้นจนมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอะตอมทำให้เกิดการหลุดออกจากกัน ในที่สุด ในสภาพที่โลหะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวอะตอมของโลหะจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาเพราะไม่มีแรงขับที่จะผลักดันอะตอมให้อยู่ในสภาพใดสภาพหนึ่งได้ แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของอะตอมในโลหะหลอมเหลวจะลดลงเนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อน และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature) อนุภาคบางส่วนจะหยุดการเคลื่อนที่ที่เกิดแรงดึงดูดระหว่างอะตอมกลายเป็นของแข็งที่เรียกว่านิวเคลียส และอุณหภูมียังลดลงอย่างต่อเนื่องอะตอมอื่นที่อยู่ในของเหลวจะเคลื่อนเข้าเกาะนิวเคลียสทำให้นิวเคลียสโตขึ้นเรื่อยๆ เริ่มมีการแผ่กิ่งก้านออกเรียกว่าเดนไดรต์ (Dendrite) และจะมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องจนไปชนกับเดนไดรต์อื่นๆ ทำให้กระบวนการเติบโตของเดนไดรต์หยุดลงเมื่อผลึกของเดนไดรต์มาชนกันซึ่งผลึกของเดนไดรต์แต่ละตัวก็คือเกรน ดังนั้นจุดที่เกรนแต่ละเกรนมาชนกันก็คือขอบเกรน (Grain Boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (ก) เริ่มเกิดการฟอร์ม Nuclei (ข) Nuclei เริ่มโตขึ้นเป็นผลึก (ค) ผลึกโตมาชนกันเป็นเกรนและบริเวณเชื่อมต่อกันระหว่างเกรนเรียกว่าขอบเกรน [9]

กระบวนการแข็งตัวของโลหะจะเริ่มเกิดการแข็งตัวได้เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (T_m) จะเกิดการเปลี่ยนจากสถานะหลอมเหลวไปเป็นของแข็ง เนื่องจากมีแรงขับสำหรับการแข็งตัว (Driving Force for Solidification) ทำให้พลังงานอิสระของระบบลดลง (Free Energy, ΔG) โดยจะมีพลังงานอิสระของการเปลี่ยนสถานะแสดงในรูปที่ 2.2 และพลังงานอิสระของเหลวเท่ากับ

$$G^L = H^L - TS^L \quad (2.1)$$

และพลังงานอิสระของแข็งเท่ากับ

$$G^S = H^S - TS^S \quad (2.2)$$

ดังนั้นที่ จุด T จะมี ΔG เท่ากับ

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (2.3)$$

ณ จุดหลอมเหลว T_m พลังงานอิสระของของแข็งและของเหลวจะเท่ากัน นั่นคือ $\Delta G = 0$ เพราะฉะนั้น

$$\Delta G = \Delta H - T_m \Delta S = 0 \quad (2.4)$$

ดังนั้นที่จุด T_m

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_m} = \frac{L}{T_m} \quad (2.5)$$

ในกรณีที่มีปริมาณของ Under cooling น้อย ๆ จะไม่สนใจค่า ΔH กับ ΔS เพราะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้น

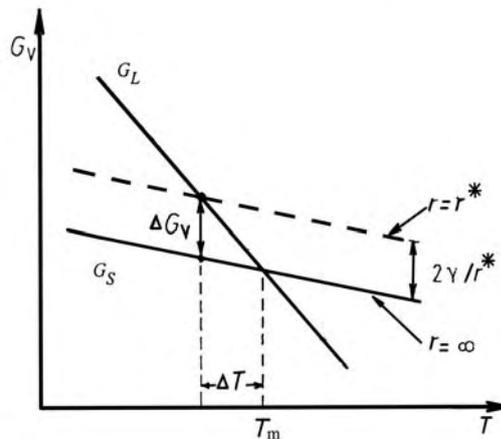
$$\Delta G = \frac{L \Delta T}{T_m} \quad (2.6)$$

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระของระบบ

ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ ($T_m - T$)

ΔH หรือ L ความแตกต่างของความร้อนแฝงของการแข็งตัว

T_m คือ จุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.2 พลังงานอิสระของแข็งและของเหลว [10]

2.2.1 กระบวนการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Nucleation)

ในกระบวนการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกันนี้เกิดจากอะตอมรวมตัวกันเป็นกลุ่มเล็ก ๆ เรียกว่า Embryo ถ้ามีขนาดใหญ่กว่า r^* (Critical Radius) จะสามารถโตต่อไปและกลายเป็นนิวเคลียสในเวลาต่อมา แต่ถ้า Embryo มีขนาดเล็กกว่า r^* จะถูกละลายกลับไปในของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถคำนวณหาพลังงานอิสระของนิวเคลียสในกระบวนการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกันได้ดังสมการที่ 2.7

$$\Delta G_{\text{Homogeneous}} = -4/3\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \quad (2.7)$$

เมื่อ ΔG_V คือ พลังงานอิสระของของแข็งที่เกิดในของเหลว (Volume Free Energy)

γ_{SL} คือ พลังงานระหว่างผิวสัมผัสของของแข็งกับของเหลว (Interfacial Energy)

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของเหลวไปเป็นของแข็งจะเกิดผิวสัมผัสระหว่างนิวเคลียสกับของเหลว ซึ่งนิวเคลียสมีพลังงานเป็นค่าลบ ในขณะที่พลังงานระหว่างผิวสัมผัสมีค่าเป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นเราสามารถหาขนาดของ r^* ได้จาก

$$r_{\text{Homogeneous}}^* = \frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_V} \quad (2.8)$$

และหาพลังงานอิสระของ r^* ได้จากการแทนที่ $r_{\text{Homogeneous}}^*$ ในสมการที่ 2.7

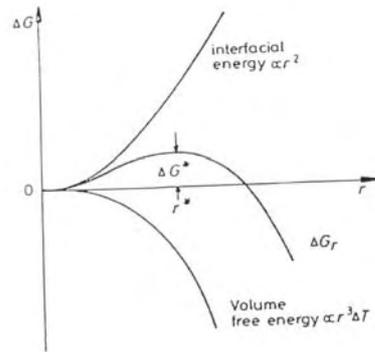
$$\Delta G_{\text{Homogeneous}}^* = \frac{2\pi \gamma_{SL}^3}{3[\Delta G_V]^2} \quad (2.9)$$

แทนค่าของ ΔG ลงในสมการที่ 2.7 จะได้ว่า

$$r_{\text{Homogeneous}}^* = \left(\frac{2\gamma_{SL} T_m}{L_V} \right) \frac{1}{\Delta T} \quad (2.10)$$

และหาพลังงานอิสระของ r^* ได้เท่ากับ

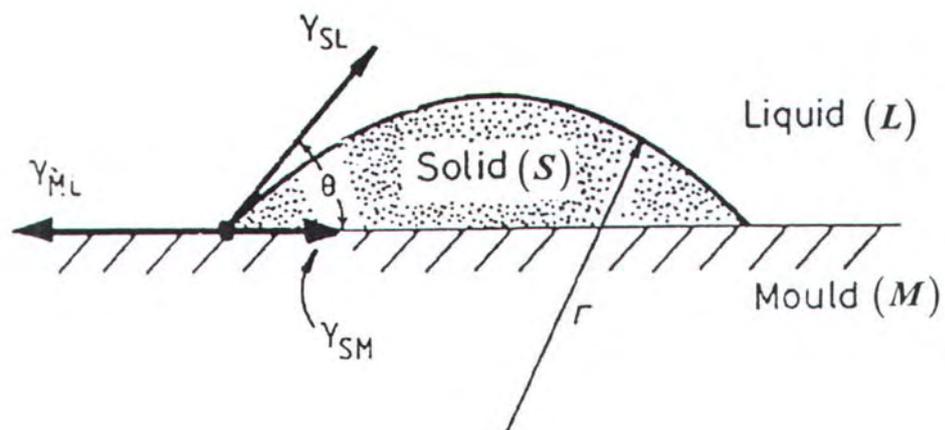
$$\Delta G_{\text{Homogeneous}}^* = \frac{[16\pi \gamma_{SL}^3 T_m^2] / 3L_V^2}{1/[\Delta T]^2} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในการนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกันของทรงกลมรัศมี r [10]

2.2.2 กระบวนการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน (Heterogeneous Nucleation)

กระบวนการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกันเป็นกระบวนการเกิดนิวเคลียสที่ไม่ได้เกิดจากเนื้อวัสดุเดิม แต่เกิดจากผนังของแบบหล่อ สารปนเปื้อน หรือสารที่เติมลงไปซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าและไม่ละลายในโลหะหลอมเหลว ทำหน้าที่เป็นพื้นผิวหรืออนุภาคเริ่มเกิดผลึกและเป็นผลให้อะตอมของโลหะหลอมเหลวแพร่เข้ามารวมตัวและโตเป็นผลึกได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องรวมตัวกันเองเพื่อให้มีขนาดใหญ่กว่า r^* เหมือนแบบ Homogeneous Nucleation จากรูปที่ 2.4 พิจารณา Embryo บนพื้นผิวของผนังแบบหล่อ โดยมุม θ เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่าง Embryo กับผนังแบบหล่อซึ่งเป็นมุมที่เปียกผิว (Wetting Angle) เมื่อสมมูลย์แรงดึงผิวจะได้ว่า



รูปที่ 2.4 นิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน [10]

$$\gamma_{ML} = \gamma_{SL} \cos \theta + \gamma_{SM} \quad (2.12)$$

เมื่อ γ_{ML} คือ แรงตึงผิวระหว่างแบบหล่อกับของเหลว

γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว

γ_{SM} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับแบบหล่อ

สามารถหาพลังงานอิสระของกระบวนการได้จากสมการที่ 2.13

$$\Delta G_{\text{Heterogeneous}} = -V_S \Delta G_V + A_{SL} \gamma_{SL} + A_{SM} \gamma_{SM} - A_{SM} \gamma_{ML} \quad (2.13)$$

โดย A_{SL} คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลว

A_{SM} คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับแบบหล่อ

เมื่อ V_S คือ เมื่อปริมาตรของ Embryo ที่มีรูปร่างเป็นเส้นของวงกลมสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\Delta G^*_{\text{Heterogeneous}} = \left(-4/3 \pi r^3 \Delta G_B + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \right) S(\theta) \quad (2.14)$$

โดยที่ $S(\theta)$ มีค่าเท่ากับ

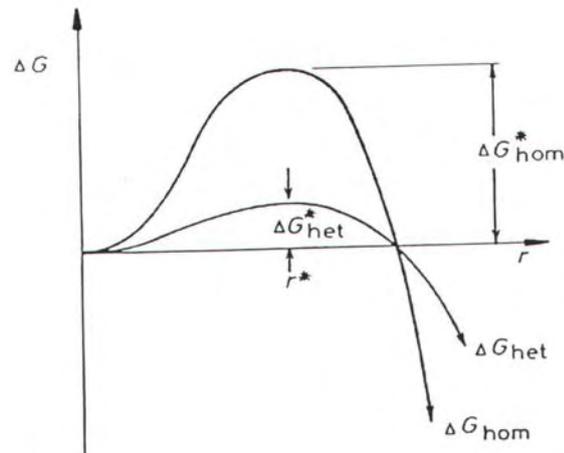
$$S(\theta) = \left(\frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} \right) \quad (2.15)$$

จากการหาอนุพันธ์ของสมการที่ 2.14 สามารถคำนวณหาขนาดของ $r^*_{\text{Heterogeneous}}$ ได้ดังนี้

$$r^*_{\text{Heterogeneous}} = \left(\frac{2\gamma_{SL} T_m}{L_v} \right) \frac{1}{(\Delta T)} \quad (2.16)$$

และคำนวณหาพลังงานอิสระของ r^* ได้จากสมการที่ 2.17

$$\Delta G^*_{\text{Heterogeneous}} = \left(\frac{16\pi\gamma_{SL}^3 T_m^2}{3L_v^2} \right) \left(\frac{1}{(\Delta T)^2} \right) S(\theta) \quad (2.17)$$



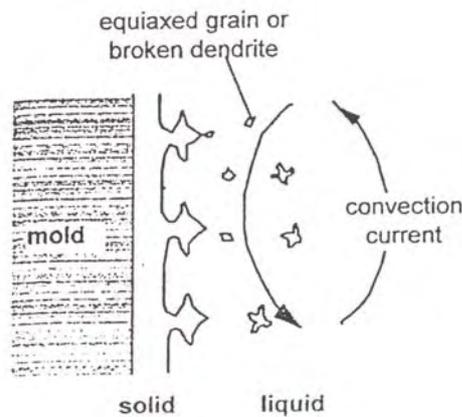
รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบพลังงานอิสระของระบบนิวเคลียสจากเนื้อเดียวกันและนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน [10]

จากสมการพบว่าพลังงานอิสระของกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous คล้ายกับกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous ทุกอย่างยกเว้นเทอมของ $S(\theta)$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แต่มากกว่าศูนย์ ดังนั้น $\Delta G_{\text{hetero}} < \Delta G_{\text{homo}}$ ทำให้การเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous ใช้พลังงานน้อยกว่าการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และความสัมพันธ์ระหว่างเทอม $S(\theta)$ กับ r^* อนุภาคเริ่มเกิดผลึกสามารถเปรียบเทียบด้วยโลหะหลอมเหลวหรือ $S(\theta)$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มาก ๆ กระบวนการเกิดนิวเคลียสก็จะเกิดขึ้นง่ายขึ้น ดังนั้น Under cooling ที่ต้องการในกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous จึงมีค่าน้อยกว่ากระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous ทำให้เกิดนิวเคลียสและโตต่อได้ง่ายกว่า [11]

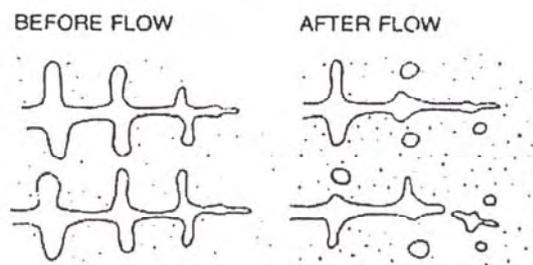
2.2.3 กระบวนการเกิดนิวเคลียสจากการสั่นสะเทือน (Dynamic Nucleation)

นอกจากการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous Nucleation และ Heterogeneous Nucleation แล้วยังพบว่าในสภาวะ Dynamic หรือในสภาวะที่เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการการแข็งตัว ซึ่งจะสามารถเกิดเดนไดรต์แบบ Equiaxed ขึ้นได้ โดยเรียกการเกิดนิวเคลียสแบบนี้ว่า Dynamic Nucleation ซึ่งเกิดจากกลไกของ Crystal Fragmentation เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงแบบหล่อจะเกิดการไหลวนเนื่องจากการเท ร่วมกับ Thermal Solutal Convection ซึ่งเป็นการไหลที่เกิดจากความต่างของอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของโลหะหลอมเหลวบริเวณต่างๆ กล่าวคือ โลหะหลอมเหลวในบริเวณที่อยู่ติดกับผนังแบบหล่อเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะมีความหนาแน่นมากกว่าโลหะหลอมเหลวส่วนที่อยู่ตรงกลางของงานหล่อ ทำให้เกิดการไหลในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Thermal Convection ในขณะเดียวกันบริเวณ Solid/Liquid Interface จะเกิดการไหลขนานกับ Interface เนื่องจากความ

หนาแน่นที่ต่างกัน ซึ่งเกิดความแตกต่างกันของปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) เช่นกัน โดยทิศทางการไหลจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย (Solvent) เมื่อนำเอาผลมารวมกันจะเกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวบน Solid/Liquid Interface ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดการหลอมเหลวเฉพาะจุด (Local Remelting) ของเดนไดรต์แบบแท่ง (Columnar Dendritic) ดังรูปที่ 2.7 และการเกิดการแตกหักของเดนไดรต์ (Dendrite Fragmentation) จะเกิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มความแรงของการเกิด Convection เช่นการให้แรงสั่นสะเทือนทางกล คลื่นอัลตราโซนิก และการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นต้น การเกิด Dynamic Nucleation จะเกิดขึ้นเมื่อมีนิวเคลียสของเดนไดรต์ขนาดเล็ก (Pre-Dendritic Nuclei) เกิดขึ้นขณะเทโลหะหลอมเหลวโดยเดนไดรต์ขนาดเล็กดังกล่าวเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณผนังแบบหล่อ และถูกพัดเข้าสู่โลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแบบหล่อ จากการไหลที่รุนแรงในช่วงแรกของการเทโลหะหลอมเหลว เมื่อถูกพาเข้าสู่โลหะหลอมเหลวเดนไดรต์ขนาดเล็กบางส่วนจะถูกละลายกลับไปเป็นโลหะหลอมเหลว เมื่อโลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแบบหล่ออยู่ในสภาวะ Undercooling เดนไดรต์ขนาดเล็กส่วนที่ยังเหลืออยู่จะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสและเกิดการเติบโตแบบ Equiaxed ซึ่งคงอยู่ได้โดยไม่ถูกละลายกลับไป



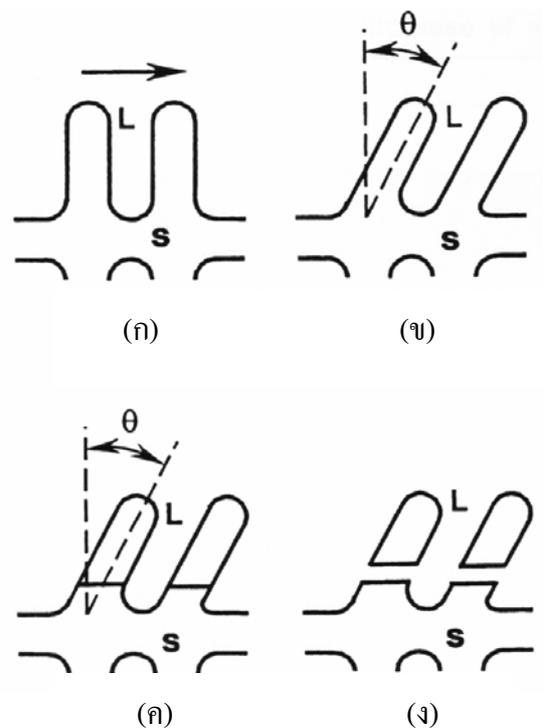
รูปที่ 2.6 แบบจำลองการเกิด Thermal Convection และการเคลื่อนที่ของเดนไดรต์จากบริเวณผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ [12]



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการหลอมละลายของเดนไดรต์เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว [13]

2.2.4 กลไกการเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะไม่เป็นกิ่งก้าน (Mechanism for Formation Non-Dendritic Structure)

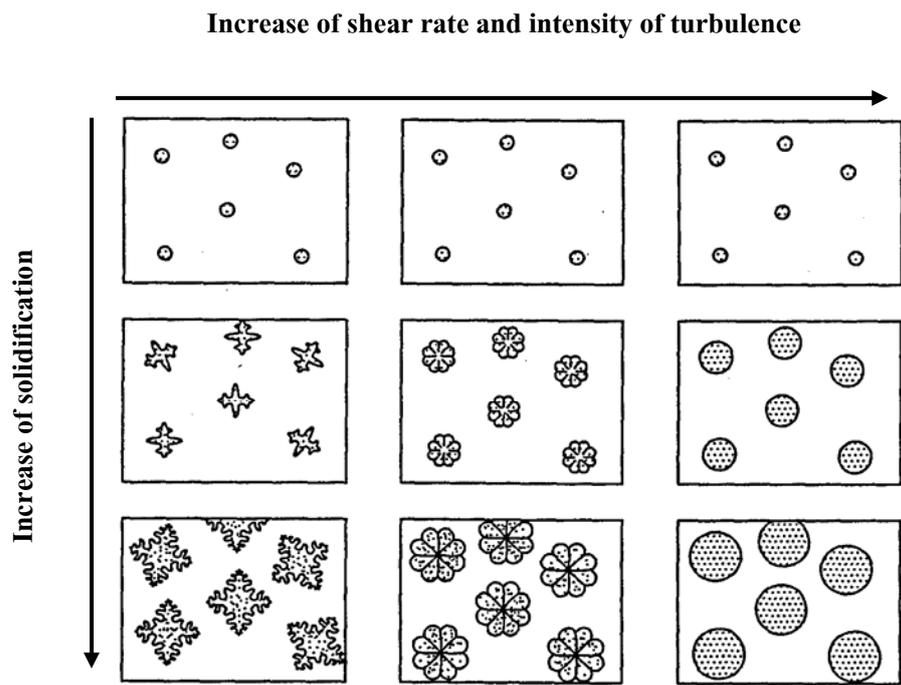
Vogel และคณะ [14] ได้อธิบายการปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยการกวนโลหะหลอมเหลวโดยใช้กลไกการแตกหักของแขนของโครงสร้างกิ่งก้าน (Dendrite Arm Fragmentation Mechanism) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งกล่าวว่าการกวนน้ำโลหะจะทำให้เกิดแรงเฉือน ส่งผลให้แขนของโครงสร้างกิ่งก้านเกิดการตัดอย่างฉับพลันในทิศทางต่างๆ และเกิดคิสโตเคชั่นขึ้น เมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงคิสโตเคชั่นจะทำให้แขนของผลึกกิ่งก้าน มีมุมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเกิดขึ้นของผลึกใหม่ (Recrystallization) ทุกๆขอบเกรนจึงมีพลังงานมากกว่าพลังงานผิวสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งกับของเหลว ทำให้แขนโครงสร้างกิ่งก้านหลุดออกจากขอบเกรน



รูปที่ 2.8 กลไกการแตกหักของแขนของโครงสร้างกิ่งก้าน (ก) โครงสร้างกิ่งก้านสภาพปกติ (ข) แขนของโครงสร้างกิ่งก้านเกิดการตัดงอ (ค) แขนโครงสร้างกิ่งก้านที่ตัดงอมีมุมเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีผลึกใหม่เกิดขึ้น (ง) แขนของโครงสร้างกิ่งก้านหลุดออกจากขอบเกรน [14]

Fan [15] ได้สรุปผลการศึกษาของหลายๆงานวิจัย ถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะจากโครงสร้างกิ่งก้านไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมภายใต้แรงกระทำ โดยได้แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นลำดับดังต่อไปนี้

1. เมื่อโลหะที่กำลังแข็งตัวภายใต้แรงกระทำ (forced convection) จะส่งเสริมให้มีการเกิดขึ้นของผลึก เพราะแรงกระทำช่วยเพิ่มการถ่ายเทของมวลขณะเกิดกระบวนการแข็งตัว
2. การไหลลักษณะราบเรียบ (Laminar Flow) จะทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้านหรือดอกกุหลาบ (Rosette) ขณะที่การไหลลักษณะปั่นป่วน (Turbulence Flow) ทำให้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นดอกกุหลาบเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลม (Sphere)
3. การเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นดอกกุหลาบหรือโครงสร้างที่มีลักษณะกลมภายใต้แรงกระทำ น่าจะเป็นปรากฏการณ์ของการเกิดผลึก (Growth Phenomenon) มากกว่าเกิดจากกลไกการแยกตัวทางกล
4. โครงสร้างที่มีขนาดเล็กภายใต้การกวาดโลหะหลอมเหลวอย่างรุนแรง เป็นไปได้ที่อาจเกิดจากหลายๆ กลไกของการเกิดผลึก เช่น ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ส่วนผสมและการกระจายตัวของนิวเคลียส



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างกิ่งก้านเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นดอกกุหลาบ และเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมภายใต้แรงกระทำที่มีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นและการไหลลักษณะปั่นป่วนที่รุนแรง [15]

2.3 การเกิดโครงสร้างขณะทำให้เกิดการหลอมละลายบางส่วนและค้างโลหะที่อุณหภูมิคงที่ (Structure Evolution During Partial Remelting and Isothermal Holding) [15]

การเตรียม Slurry สำหรับกระบวนการ Thixoforming ทำโดยการให้ความร้อนกับโลหะชิ้นต้น (Feed Stock) จนอยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มและสิ้นสุดการแข็งตัว (Solidus-Liquidus Temperature) เพื่อให้เปลี่ยนจากสภาพของแข็งสู่สภาพกึ่งของแข็ง ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงมีความสำคัญเพื่อให้ได้อนุภาคเฟสของแข็งที่มีลักษณะกลม ขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอในเฟสของเหลวซึ่งจะช่วยให้คุณสมบัติการไหลตัวในแม่พิมพ์สม่ำเสมอ โดยสามารถทดสอบคุณสมบัตินี้ได้ง่ายด้วยการทดสอบการตัด (Cut Test) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การทดสอบตัด Slurry ด้วยมีด [2]

แรงขับเคลื่อนที่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงในสภาพกึ่งของแข็ง เกิดจากการลดลงของพลังงานระหว่างเฟสของแข็งกับเฟสของเหลว ที่เกิดจากกระบวนการแพร่ซึม เวลาในช่วงนี้จะต้องมากพอเพื่อให้โครงสร้างลักษณะกิ่งก้าน (Dendritic or Rosette) เปลี่ยนเป็นโครงสร้างลักษณะกลม (Spherical or Globular) ทั้งนี้เวลาในการค้างโลหะจะต้องไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้เกรนหยาบ ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางกล การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะทำให้เกิดการหลอมละลายบางส่วนและค้างโลหะที่อุณหภูมิคงที่ ได้มีการศึกษาไว้ จะยกตัวอย่างต่อไปนี้

Kiuchi [16] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะแมกนีเซียมผสมเกรด ZE33 เมื่อมีสัดส่วนของแข็งแตกต่างกันพบว่า โครงสร้างเกรนจะมีลักษณะหยาบมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของแข็งลดลง

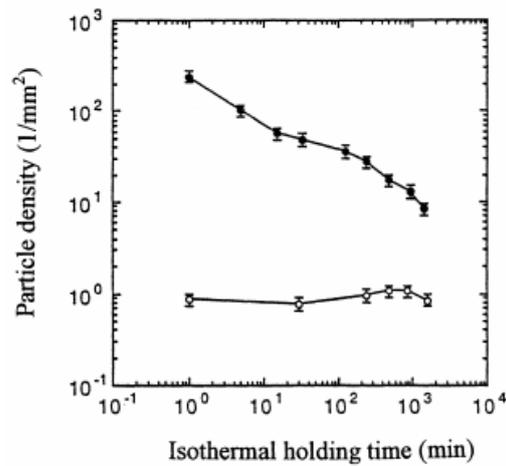
Loue และ Suery [17] ได้ศึกษาผลของกระบวนการ Thermomechanical ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะให้ความร้อน ของโลหะผสม A357 พบว่า ในระหว่างที่เกิดโครงสร้างเป็นเกรนหยาบ เมื่อเพิ่มเวลาดำเนินการ โลหะ เฟสของแข็งที่มีลักษณะกลม ความหนาแน่นจะมีปริมาณลดลง ขณะที่โครงสร้างลักษณะกิ่งก้านที่เหลือ ความหนาแน่นจะมีปริมาณคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 อีกทั้งยังได้ศึกษาผลของการขึ้นรูปเย็นก่อนให้ความร้อนสู่สภาพกิ่งของแข็ง กับโลหะผสม A356 พบว่าการขึ้นรูปเย็นมีผลให้กระบวนการเกิดโครงสร้างลักษณะกลมเกิดขึ้นได้เร็ว และได้กล่าวถึงผลการศึกษากับโลหะผสม A356 ของ Yunhua และคณะว่าถ้าปริมาณการขึ้นรูปเย็นมากเกินไปและให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ได้โครงสร้างเกรนหยาบ

Blais และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของโครงสร้างก่อนให้ความร้อนสู่สภาพกิ่งของแข็งของโลหะผสม A357 เมื่อเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธีต่างๆ พบว่าโลหะขึ้นต้นที่เตรียมจากทุกวิธี โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นลักษณะกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยโลหะขึ้นต้นที่มีค่าความกลมของเกรน (Shape Factor:Fg) ก่อนให้ความร้อนมีค่ามาก กระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างลักษณะกลมจะเกิดได้เร็วกว่าและต้องการเวลาดำเนินการโลหะมากขึ้นเพื่อให้โครงสร้างลักษณะกลมมากขึ้น แต่จะทำให้ขนาดของเกรนเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นผลการทดลองกับโลหะชนิดเดียวกันเมื่อเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี MHD Stirring

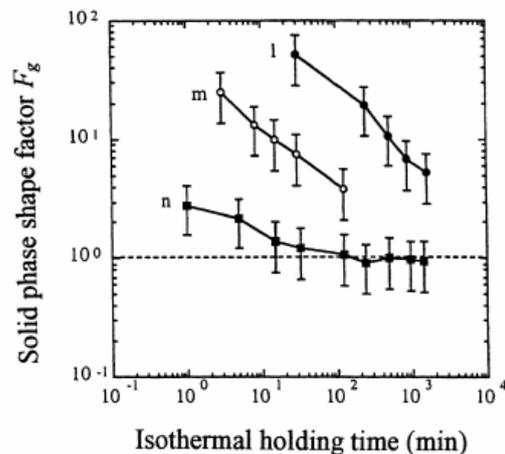
สำหรับปรากฏการณ์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างที่เกิดโครงสร้างเกรนหยาบ เป็นการตกค้างของเฟสของเหลวภายในอนุภาคเฟสของแข็ง และนอกจากนั้นเฟสของแข็งขนาดเล็กๆ ที่มีเฟสของเหลวตกค้างอยู่ด้วยจะเกิดการหลอมละลายแล้วรวมตัวกับเฟสของเหลวใกล้เคียงที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งกรณีหลังนี้เฟสของเหลวตกค้างจะมีลักษณะซับซ้อน โดยเฉพาะเมื่อเวลาดำเนินการโลหะสั้น

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะทำให้เกิดการหลอมละลายบางส่วนและล้างโลหะที่อุณหภูมิคงที่ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ [15]

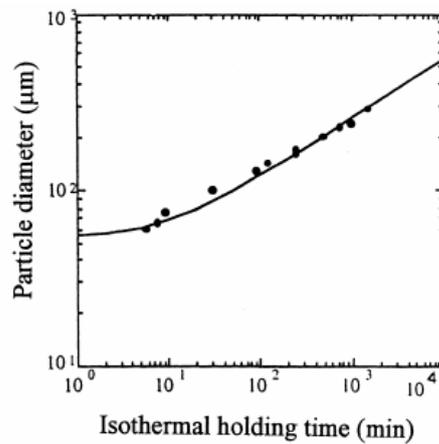
1. เกิดการหลอมละลายของเฟสที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำ ที่อยู่บริเวณขอบเกรน
2. แขนของโครงสร้างกิ่งก้าน (Dendrite Arms) ที่มีเฟสของเหลวแทรกอยู่ จะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว
3. อนุภาคเฟสของแข็งจะเปลี่ยนเป็นลักษณะกลม ด้วยกระบวนการแพร่ซึมของอะตอมจากพื้นที่ที่มีความโค้งมากกว่าไปสู่พื้นที่ที่มีความโค้งน้อยกว่า
4. การละลายของอนุภาคเฟสของแข็งขนาดเล็กๆและการรวมระหว่างอนุภาคจะทำให้เกรนมีขนาดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคเฟสของแข็งกับเวลาดำงโลหะเมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส (สัดส่วนของแข็ง 0.45) ของโลหะผสม A357 ที่เตรียม โลหะขึ้นต้นด้วยวิธีหล่อแบบเดิม (Conventional) โครงสร้างก่อนให้ความร้อนมีลักษณะกลม (O) และเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี MHD Stirring โครงสร้างก่อนให้ความร้อนมีลักษณะเป็นกึ่งก้าน (O) [17]

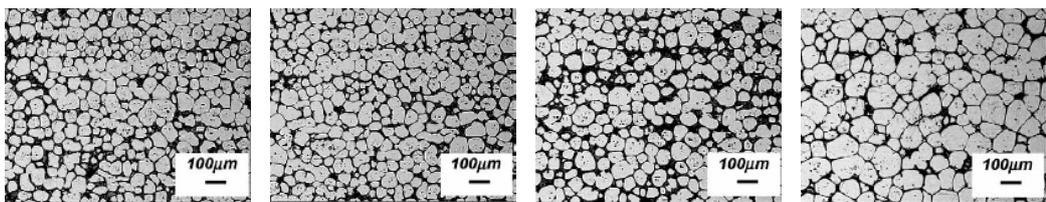


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของเกรน (Solid Shape Factor: F_g) กับเวลาดำงโลหะ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส (สัดส่วนของแข็ง 0.50) ของโลหะผสม A357 ที่เตรียม โลหะขึ้นต้นด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่อง (I) ไม่ปรับสภาพเกรนละเอียด (m) ปรับสภาพเกรนละเอียดและวิธี MHD Stirring (n) [18]



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับเวลาดำงโลหะเมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส (สัดส่วนของแข็ง 0.50) ของโลหะผสม A357 ที่เตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี MHD Stirring [18]

ในรูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 2014 เมื่อเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยการขึ้นรูปเย็น นำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง จะทำให้เกิดผลึกใหม่ เนื่องจากความเครียดและเกิดการหลอมละลายบางส่วน ซึ่งเรียกว่า Recrystallization and partial melting:RAP เมื่อเวลาดำงโลหะเพิ่มมากขึ้นเกรนจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นไปด้วยแต่ความกลม (Shape factor: F_{α}) ของเกรนจะต่ำลง โดยเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้เฟสของเหลวตกค้างจากภายในไปจนถึงขอบชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



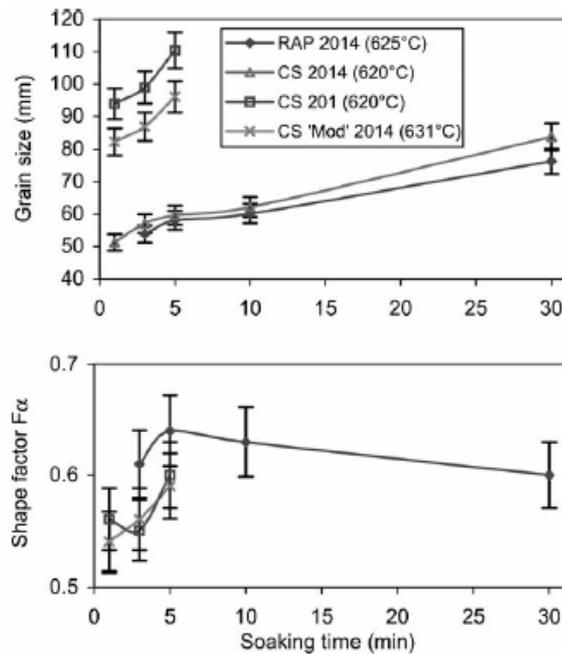
(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 2014 เมื่อเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี RAP นำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 625 องศาเซลเซียส ในเตาเกลือแล้วค้างโลหะเป็นเวลา (ก) 3 นาที (ข) 5 นาที (ค) 10 นาที (ง) 30 นาที [19]



รูปที่ 2.15 ขนาดเกรนและ Shape factor ในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ เมื่อเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธี RAP และ Cooling Slope:CS [19]

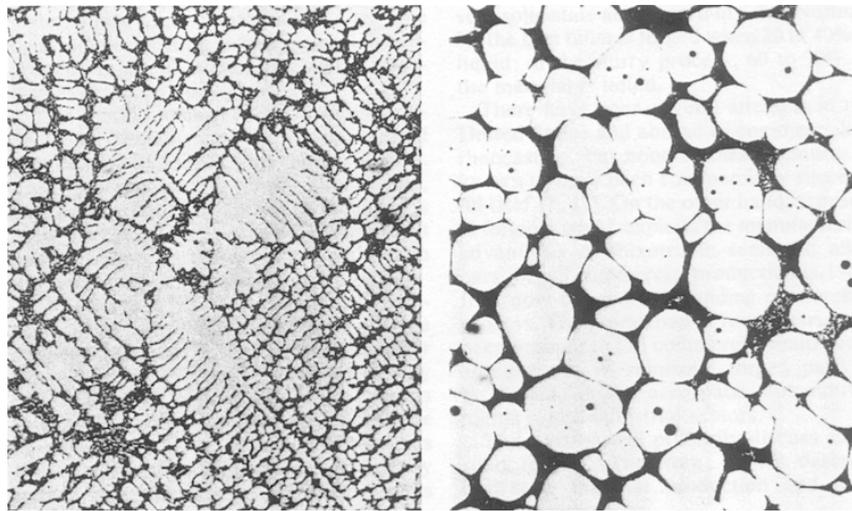
2.4 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Processing)

การผลิตชิ้นส่วนโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง จะต้องเตรียมโลหะให้อยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มและสิ้นสุดการแข็งตัว (Solidus-Liquidus Temperature) ซึ่งจะทำให้โลหะประกอบด้วยเฟสของแข็งและเฟสของเหลว เรียกว่า “Slurry” ในขั้นตอนการเตรียม Slurry นั้นต้องควบคุมลักษณะรูปร่าง (Morphology) ของเฟสของแข็งให้มีขนาดเล็กละเอียด (น้อยกว่า $100\mu\text{m}$) มีลักษณะกลม (Globular) หรือมีลักษณะคล้ายดอกกุหลาบ (Rosette) โดย Slurry ในอุดมคตินั้นต้องมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ (Homogeneous) ไม่มีออกไซด์ และสารปนเปื้อนต่างๆ กระบวนการผลิต Slurry ที่ดีนั้นมีความสำคัญและเป็นที่ต้องการอย่างมาก

โครงสร้างที่ไม่เป็นกิ่งก้านและค่อนข้างกลม (Non-Dendritic or Globular) นั้นเป็นที่ต้องการอย่างมากในผลิตชิ้นส่วนโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง เพราะโครงสร้างลักษณะดังกล่าวจะทำให้โลหะมีความสามารถในการไหล (Flowability) ที่ดี ทำให้ความหนืด (Viscosity) ของโลหะในระหว่างการขึ้นรูปลดลงภายใต้การให้แรงเฉือน (Shear Force) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง

โลหะที่อยู่ในสภาพกึ่งของแข็งนั้นสามารถแสดงพฤติกรรมทั้งในแบบที่เป็นของเหลวและของแข็ง กล่าวคือ สามารถรักษาลักษณะรูปร่างได้เหมือนของแข็ง และสามารถไหลได้เหมือนของเหลวภายใต้สภาวะที่มีอัตราการเสียรูปสูง (High-Plastic Deformation Rate) ซึ่งการที่โลหะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็งจะสามารถทำให้การไหลตัวเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ทำให้การเติมเต็ม (Fully Cavitations) และมีความสม่ำเสมอของการเติม การปราศจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) จึงช่วยลดปัญหาการเกิดก๊าซตกค้าง (Gas Entrapment) ซึ่งเป็นสาเหตุของรูพรุน (Porosity) ส่งผลให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ในรูปที่ 2.16 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมที่ผลิตจากกระบวนการหล่อแบบเดิมและจากการผลิตในสภาพกึ่งของแข็ง

จากข้อดีดังกล่าว จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากกระบวนการผลิตในสภาพกึ่งของแข็ง มีโอกาสเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) และรูพรุน (Porosity) ที่น้อยกว่าการหล่อแบบดั้งเดิม (Conventional Casting) การเติมโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์เนื่องจากทำให้เกิด Thermal Shock ที่น้อยกว่า ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใกล้เคียงหรือเท่าที่ต้องการ (Near Net Shape) ซึ่งช่วยลดขั้นตอนในการตัดแต่ง ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลง จึงเป็นเหตุผลให้เกิดแรงผลักดันในการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมที่ผลิตจากกระบวนการต่างกัน

(ก) โครงสร้างแบบกึ่งก้านจากการหล่อแบบเดิม (ข) โครงสร้างลักษณะกลมจากการผลิตในสภาพกึ่งของแข็ง [2]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างๆ จากการหล่อด้วยวิธีต่างๆ [2]

Properties	RC	TC	SC	HPDC	LP casting
shrinkage porosity	3	3	2	1	2
blow hole	2	2	2	0	2
Segregation	2	2	1	2	2
mechanical properties	3	3	2	0	1
wrought alloy application	3	2	1	0	2
hot tearing	3	3	1	0	2
metal fluidity	2	2	3	3	2
casting cycle time	2	2	1	3	2
die life	3	3	1	2	0
product cost	2	0	1	3	3
Total	25	22	15	13	17

Note : 3 = Excellent, 2 = Good, 1 = Some What Poor, 0 = Poor, RC = Rheocasting,

TC = Thixocasting, SC = Sand Casting, HPDC = High Pressure Die Casting,

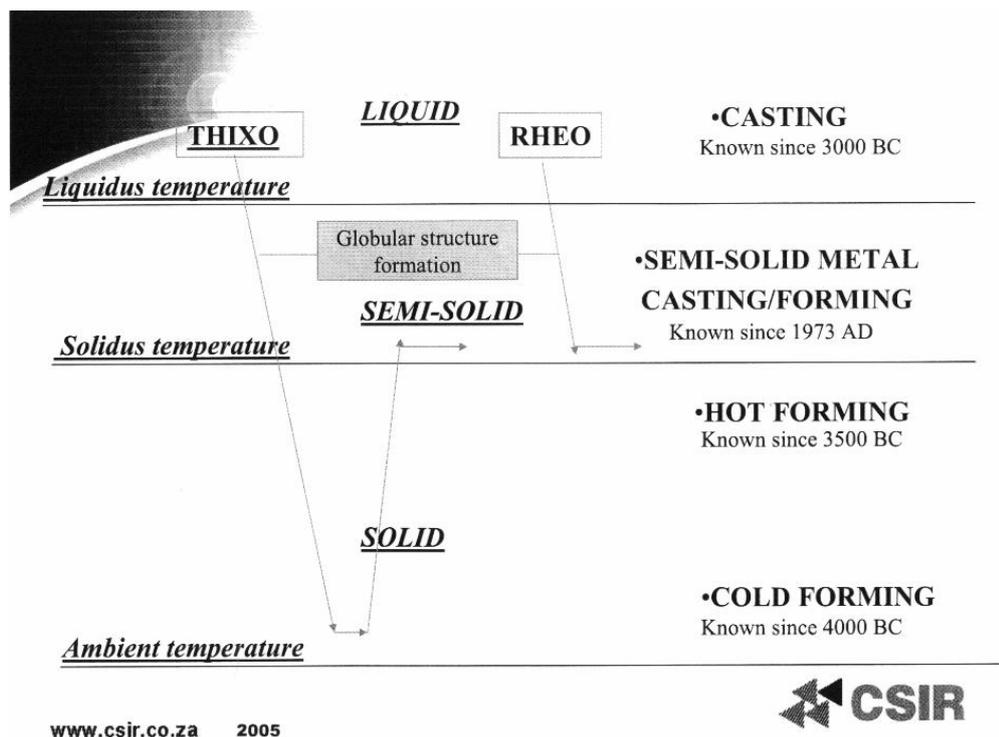
LP casting = Low Pressure casting

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะของชิ้นส่วนยานยนต์ ที่ผลิตด้วยวิธีต่างๆ [2]

manufacturing process	Master Break Cylinder		Fuel Rails	
	PM	SSM forming	SF	SSM forming
Annual production (millions/yr)		2.8		1.0
Part weight (lbs)	1.7	0.98	1.5	0.735
Minimum wall thickness (mm)	6.3	3.2	5.1	3.8
Leak rate (%)	2	0	4	0.1
Machining steps	18	5	82	26

Note : PM = Permanent Mould, SF = Solid Forging, SSM = Semi Solid metal forming

จากที่กล่าวมากระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะในสภาพกึ่งของแข็งในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม ได้แก่ กระบวนการ Rheocasting และกระบวนการ Thixoforming ช่วงอุณหภูมิที่ใช้เตรียม Slurry ของกระบวนการทั้งสองแสดงในรูปที่ 2.17 การเตรียม Slurry เพื่อให้ได้โครงสร้างไม่เป็นกิ่งก้าน (Non-Dendritic or Globular) มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ สำหรับกระบวนการ Rheocasting จะเตรียม Slurry จากของเหลวโดยตรงแล้วป้อนโลหะเข้าโมลด์ในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป ในส่วนของกระบวนการ Thixoforming การเตรียม Slurry จะได้จากการให้ความร้อน (Reheat) กับโลหะขึ้นต้นจากสภาพของแข็งสู่สภาพกึ่งของแข็งเพื่อให้ได้โครงสร้างลักษณะกลม แล้วป้อนโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป โลหะขึ้นต้นสำหรับกระบวนการ Thixoforming สามารถเตรียมได้จากโลหะในสภาพของแข็งและเตรียมจากโลหะหลอมเหลวเช่นเดียวกับการเตรียม Slurry สำหรับกระบวนการ Rheocasting แล้วปล่อยให้เย็นตัวสู่สภาพของแข็งก่อนจึงนำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง ดังจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 2.17 ช่วงอุณหภูมิในการเตรียม Slurry จากของเหลวสำหรับกระบวนการ Rheocasting และการเตรียม Slurry จากการ Reheat จากสภาพของแข็งสู่สภาพกึ่งของแข็ง สำหรับกระบวนการ Thixoforming [2]

2.5 วิธีเตรียมโลหะขั้นต้น (Feed Stock) สำหรับกระบวนการ Thixoforming

2.5.1 การกวนโลหะขณะแข็งตัวด้วยวิธีกล (Mechanical Stirring Process)

โดยการใช้ใบกวน (Stirrer) กวนโลหะหลอมเหลวขณะเกิดการแข็งตัว (Solidification) เพื่อให้ได้โครงสร้างไม่เป็นกิ่งก้าน แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดที่สำคัญคือ การเกิด Erosion ที่ใบกวนและของเหลวจะมีโอกาสเกิดการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ออกไซด์และมี Productivity ที่ต่ำ Slurry ที่ได้จากกระบวนการนี้ยังมีแนวโน้มที่มีโครงสร้างลักษณะหยาบและมีโครงสร้างที่เป็นลักษณะตามต้องการที่น้อยกว่ากระบวนการอื่น [20]

2.5.2 การกวนโลหะขณะแข็งตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magneto-Hydrodynamic :MHD or Electromagnetic Stirring)

เทคโนโลยีนี้ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาของระบบการใช้แรงกวนทางกล เป็นระบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi Continuous) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเพื่อใช้ในการผลิตโลหะขั้นต้นที่มีคุณภาพสูงและมีสิ่งปนเปื้อนในปริมาณต่ำ โดยใช้หลักการเหมือนกับ Mechanical Stirring แต่เปลี่ยนมาใช้ในการกวนโดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ประกอบกับการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Direct Chill:DC) ซึ่งจะทำให้ได้เกรนที่มีขนาดเล็กละเอียด (30-100 μ m) และมีความสม่ำเสมอ โดยสามารถผลิตโลหะขั้นต้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกระบวนการ MHD นั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำเป็นหลัก โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างกลม ซึ่งความกลมจะขึ้นอยู่กับ Electromagnetic Volume Force โดยแรงเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดการไหลใน Mushy Zone จะไม่คงที่ ดังนั้นทำให้โครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามแนวรัศมี ถึงแม้กระบวนการนี้จะสามารถผลิตโลหะขั้นต้นที่มีคุณภาพสูงและให้กำลังการผลิตสูง แต่ต้องการระบบ Degassing ขนาดใหญ่ ทำให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงตามไปด้วย [20]

2.5.3 การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ (Liquidus Casting or Low Temperature Pouring)

กระบวนการนี้ทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะกิ่งก้านน้อยกว่า โดยการเทโลหะหลอมเหลวจากอุณหภูมิสูงกว่า Liquidus เล็กน้อยซึ่งมักจะรู้จักกันในชื่อ MX หรือ Microcast-X ทำให้ได้เกรนที่มีลักษณะเป็น Equiaxed และมีขนาดเล็กละเอียด โดยกลไกการเกิดนั้นจะมีขั้นตอนผสมกันระหว่างผลของ Low superheating ในขณะเทและการเกิดการไหลแบบปั่นป่วนและการดึงเอาความร้อนออกอย่างรวดเร็ว (High Heat Extraction) ซึ่งจะทำให้ได้อนุภาค α -Aluminium ขนาดประมาณ 100 μ m [20]

2.5.4 การปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยการเติมธาตุผสม (Chemical Grain Refinement)

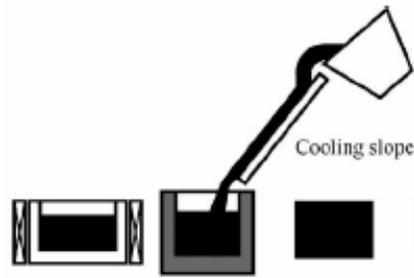
กรณีของโลหะอลูมิเนียมผสมจะนิยมใช้ธาตุไทเทเนียมและโบรอน เป็นสารปรับสภาพเกรนละเอียด ซึ่งทำให้เกิดเป็นสารประกอบ คือ ไทเทเนียมโบไรด์ ไทเทเนียมอะลูมิไนด์ สารประกอบเหล่านี้จะอยู่ในสภาพของแข็งปะปนอยู่ในโลหะอะลูมิเนียมหล่อเหลว ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียม ให้กับอะลูมิเนียมหล่อเหลว ทำให้ได้เกรนที่ละเอียดและสม่ำเสมอ

2.5.5 การสร้างความเครียดเพื่อช่วยให้หลอมละลาย (Strain Induced Melt Activation :SIMA Process or Recrystallization and Partial Melting:RAP or Thermo-mechanical Treatment)

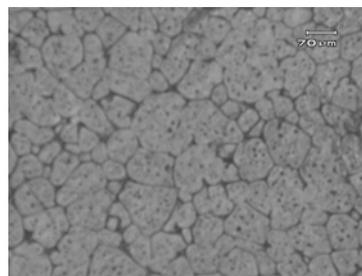
เป็นการเตรียมโลหะขั้นต้นในสภาพของแข็ง วิธีการนี้ทำโดยการสร้างความเครียดให้เกิดขึ้นในโลหะที่อยู่ในสภาพของแข็งด้วยการขึ้นรูปเย็น เมื่อนำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งจะทำให้เกิดผลึกใหม่ เนื่องจากความเครียดและเกิดการหลอมละลายบางส่วนบริเวณขอบเกรน (Partial Remelting) และเกิดการแตกหักของโครงสร้าง Primary บริเวณขอบเกรน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอนุภาคที่กลม [20]

2.5.6 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเท (Cooling Slope)

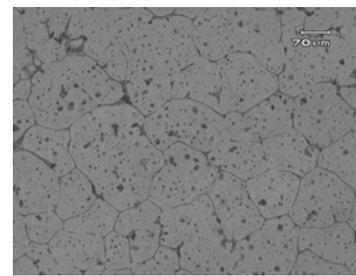
วิธีนี้ทำให้โลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทเกิดการแข็งตัวบางส่วน หรืออยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง แล้วไหลเข้าสู่โมลด์ด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งสภาวะดังกล่าวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวในระหว่างเกิดกระบวนการแข็งตัวจึงเกิดนิวเคลียสจากการสันตะเทียนและเกิดกลไกการแตกหักของแกนของโครงสร้างกิ่งก้าน งานวิจัยนี้ได้เลือกการเตรียมโลหะขั้นต้นด้วยวิธีนี้ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ การเตรียมเครื่องมือง่ายต้นทุนการผลิตจึงต่ำและสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างของโลหะขั้นต้นได้ง่ายตามความต้องการ [21] ถ้าออกแบบเครื่องมือเหมาะสมจะสามารถเตรียมโลหะขั้นต้นได้จำนวนหลายชิ้นต่อการเทโลหะหลอมเหลวครั้งเดียว สามารถให้โครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนลักษณะกลมและมีขนาดเกรนที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ รูปที่ 2.19 แสดงผลทดลองเปรียบเทียบกับโลหะผสม AA5083 เมื่อเตรียมโลหะขั้นต้นด้วยการเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทและการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำแล้วให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 30 นาที และจุ่มน้ำ ส่วนข้อจำกัดของการเตรียมโลหะขั้นต้นด้วยวิธีนี้ เมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงความกลมของเกรนจะต่ำและเกรนหาย



รูปที่ 2.18 การเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเท (Cooling Slope) [7]



(ก)

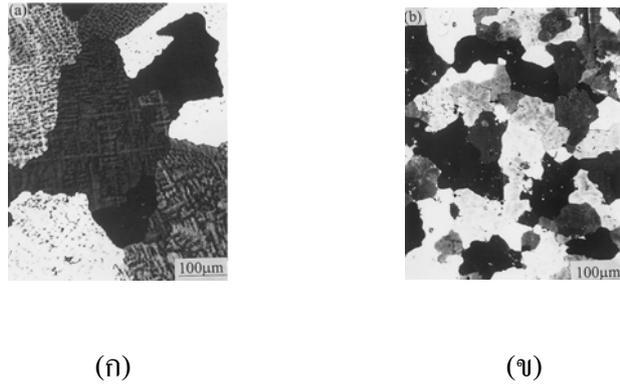


(ข)

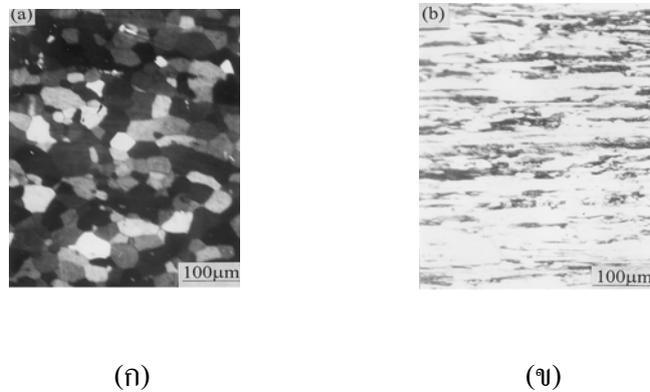
รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบลักษณะเกรนของโลหะผสม AA5083 ที่ได้จากการเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยวิธีต่างๆ แล้วให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 30 นาที แล้วจุ่มน้ำ (ก) เทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเท (ข) เทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yin และคณะ [3] ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม ที่ผสมแมกนีเซียมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักด้วยการผสมธาตุสแกนเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักและผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักนำไปอบให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 ชั่วโมง แล้วรีดร้อนให้เหลือความหนา 4 มิลลิเมตร พบว่ากรณีที่เติมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักอนุภาค Al_3Zr ที่เกิดขึ้นขณะโลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวช่วยทำให้ขนาดเกรนของโลหะลดลงแสดงดังรูปที่ 2.20 อีกทั้งยังช่วยต้านทานการเกิดผลึกใหม่และยับยั้งการเติบโตของเกรนในขณะที่ทำการอบให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะเกรนภายหลังจากการอบให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันแสดงในรูปที่ 2.21

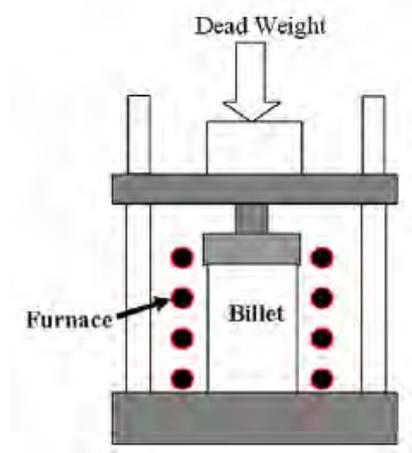


รูปที่ 2.20 โครงสร้างเกรนในสภาพหล่อของโลหะผสม (ก) Al-5.0%Mg (ข) Al-5.0%Mg-0.1%Zr [3]

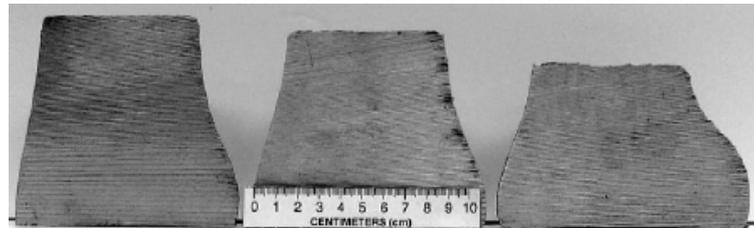


รูปที่ 2.21 โครงสร้างเกรนในสภาพรีดร้อนภายหลังอบให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันของโลหะผสม
(ก) Al-5.0%Mg โครงสร้าง Equiaxed (ข) Al-5.0%Mg-0.1%Zr โครงสร้างเส้นใยผสม
โครงสร้าง Equiaxed [3]

Nafisi และคณะ [4] ศึกษาการปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยการเติมไทเทเนียมและโบรอน (Al5Ti1B) และดัดแปลงโครงสร้างด้วยสตรอนเชียม (Al10Sr) ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหล (Rheological Behavior) ในสภาพกึ่งของแข็ง ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 พบว่าไทเทเนียมและโบรอน ทำให้โครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) มีขนาดลดลงและมีลักษณะกลม กรณีของสตรอนเชียมช่วยทำให้เกรนมีลักษณะกลมมากขึ้นและเมื่อทดสอบพฤติกรรมการไหลด้วยแรงกดคงที่ขนาด 21.6 นิวตัน (2.2 kg) ที่อุณหภูมิ 598 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที พบว่าทั้งไทเทเนียม โบรอนและสตรอนเชียม ทำให้โลหะมีพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งดีกว่าและยังให้เหตุผลเพิ่มอีกว่าธาตุสตรอนเชียมช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสของเหลวและโครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิจึงทำให้โลหะมีพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งดีกว่าเช่นเดียวกัน ซึ่งอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.22 และผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 อุปกรณ์ทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง [4]

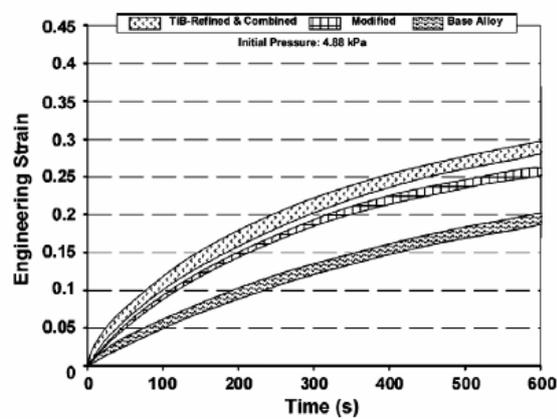


(ก)

(ข)

(ค)

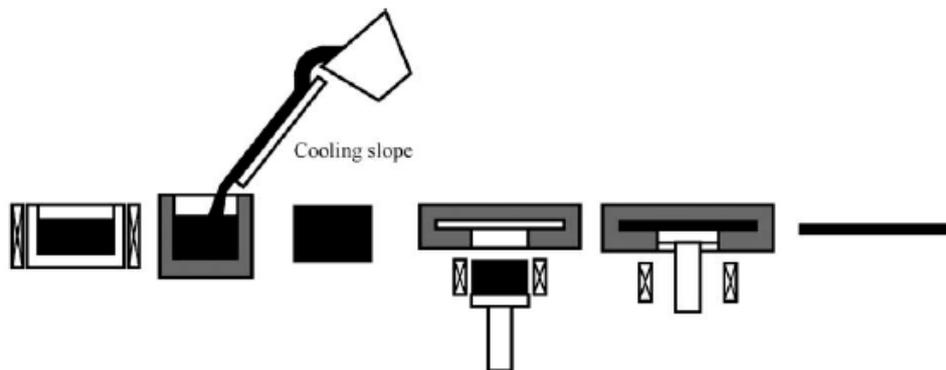
รูปที่ 2.23 ลักษณะโลหะผสม A356 ที่ผ่านการทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง
(ก) A356 (ข) A356 refined with Ti-B (ค) A356 over-refined [4]



รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลาทดสอบของการทดสอบพฤติกรรมการไหล
ในสภาพกึ่งของแข็ง ของโลหะผสม A356 [4]

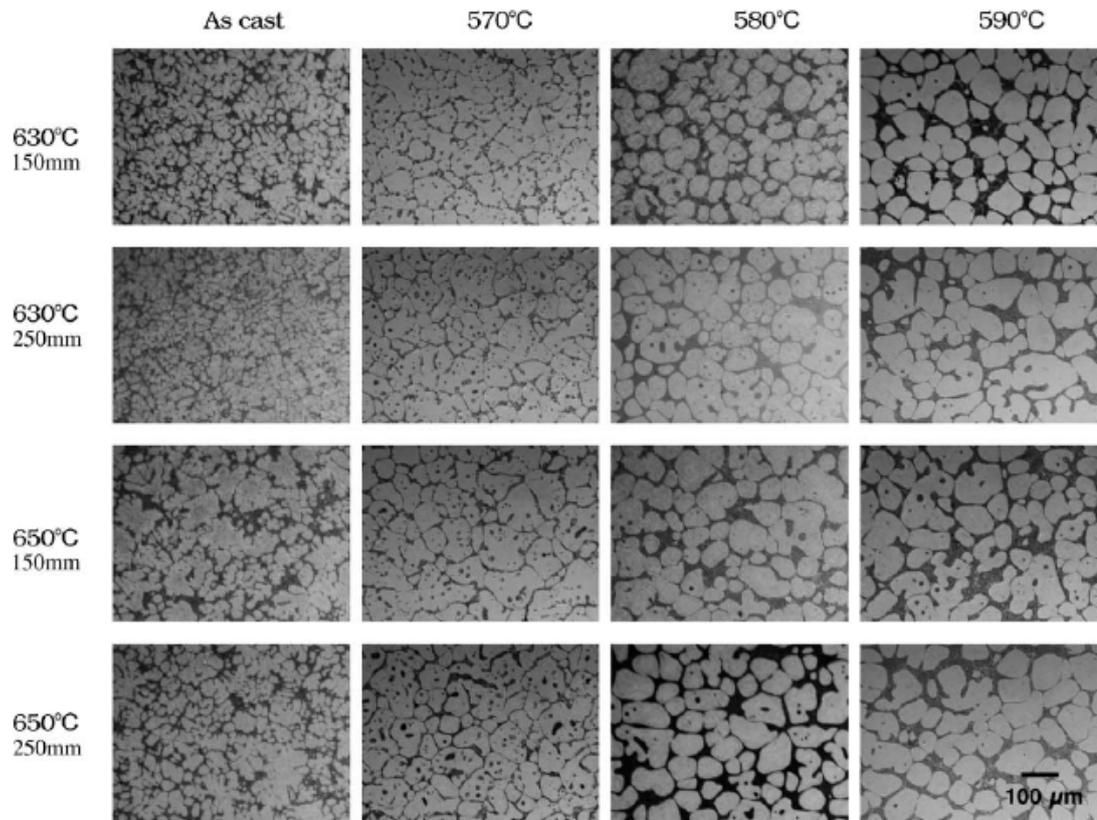
ชานนท์ บุนนที [5] ศึกษาการปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยสแกนเดียมและเซอร์โคเนียม สำหรับงานหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 โดยผสมสแกนเดียมร้อยละ 0.1 ถึงร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักและทำการผสมเซอร์โคเนียมในช่วงร้อยละ 0.05 ถึงร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักพบว่าทั้งสแกนเดียมและเซอร์โคเนียมช่วยทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงและขนาดเกรนที่ได้ยังมีความละเอียดมากขึ้นตามปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น

Haga และ Kapranosb [7] ศึกษาการเตรียมโลหะขึ้นต้นสำหรับกระบวนการ Thixoforming โดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 ด้วยรางเทที่มีความยาว 150 และ 250 มิลลิเมตร มุมเอียง 60 องศา เทโลหะผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 630 และ 650 องศาเซลเซียส แล้วนำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้ได้ขนาดเกรนที่เล็กกว่า โครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิมีความกลมมากกว่า และเมื่อใช้รางเทที่มีความยาวมากกว่าจะได้โครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความหนาแน่นมากกว่าเนื่องจากโลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทที่มีความยาวมากกว่าจะเกิดการแข็งตัวมากกว่ารางเทที่มีความยาวน้อยกว่า ผลแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 การเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเทสำหรับกระบวนการ Thixoforming [7]

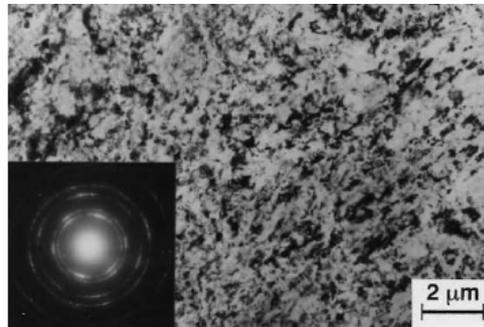
Yu และ Wenxian [22] ศึกษาคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด 2618 ที่เกิดจากเฟส $Al_3(Sc,Zr)$ โดยทำการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) จาก Ingot (Billets) ให้เป็นแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร นำไปอบที่ 423-773 K เป็นเวลา 1 ชั่วโมงรักษาอุณหภูมิในเตาเกลือ (Salt Bath) 783-788 K นาน 30 นาที ทำการชุบในน้ำเมื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วย SEM และ TEM ทำการวิเคราะห์ผล พบว่าขึ้นงานที่มีสแกนเดียม และเซอร์โคเนียม ทำให้เกิดการปรับสภาพเกรนละเอียด และอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะสูงกว่าเกรด 2618 มากกว่า 200 K อนุภาค $Al_3(Sc,Zr)$ ยังเป็นตัวขัดขวางการเกิดผลึกใหม่และจำกัดการโตของเกรน



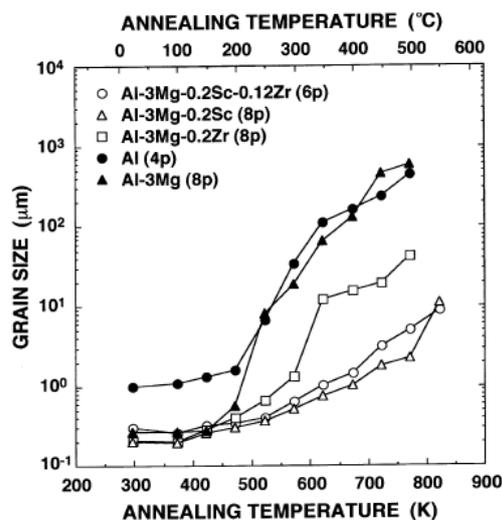
รูปที่ 2.26 ผลของอุณหภูมิและความยาวเวลาที่มิต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งเมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 570, 580 และ 590 องศาเซลเซียส แล้วจุ่มน้ำของโลหะผสม A356 [7]

Rao และ Murty [23] ศึกษาหาผลกระทบของเซอร์โคเนียมและซารมลทิน ในการปรับสภาพเกรนละเอียด พบว่าการเติมธาตุเซอร์โคเนียมทำให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเกิดอนุภาค Al_3Zr ที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึก เหล็กและซิลิคอนจะเป็นตัวเหนี่ยวรั้ง ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดลดลง ซึ่งเกิดจากการเติมธาตุทั้ง 2 ทำให้ของเหลวเกิดการอิมตัว เมื่อทำการเติม Al-5Ti-1B พบว่าเซอร์โคเนียมไม่เกิดผลที่ดีต่อการปรับสภาพเกรนละเอียด ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวของ Complex Aluminides โดยทำลายอนุภาคการเกิดผลึกของอนุภาค $TiAl_3$ และ TiB_2

Lee และคณะ [24] ศึกษาผลของธาตุสแกนเดียมและเซอร์โคเนียมต่อความเสถียรภาพของเกรนและความสามารถในการยึดตัวของโลหะผสม Al-3.0%Mg ด้วยกระบวนการ Equal-Channel Angular Pressing:ECAP พบว่าเมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักลงในโลหะผสม Al-3.0%Mg จะทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงโดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยที่ $0.2 \mu\text{m}$ ดังในรูปที่ 2.27 เป็นโครงสร้างจุลภาคที่ได้จาก TEM โดยใช้เทคนิค Selected Area Electron Diffraction:SAED และเมื่อนำโลหะที่ส่วนผสมเดียวกันนี้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ค้างโลหะเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 573 K เกรนจะเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยเหตุผลเกิดจากอนุภาค Al_3Zr กระจายตัวไม่สม่ำเสมอจึงมีบทบาทในการยับยั้งการเติบโตของเกรนลดลง [25] ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดเกรนของโลหะผสมต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.28

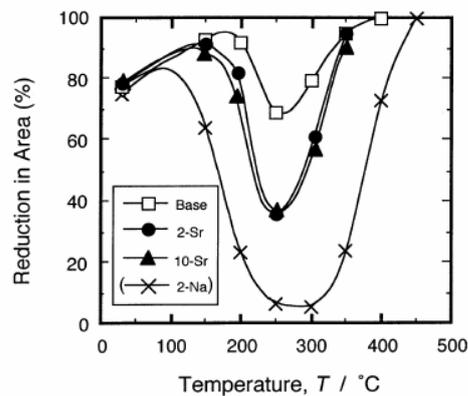


รูปที่ 2.27 โครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SAED ของโลหะผสม Al-3.0%Mg-0.2%Zr ที่ได้จากกระบวนการ ECAP [24]

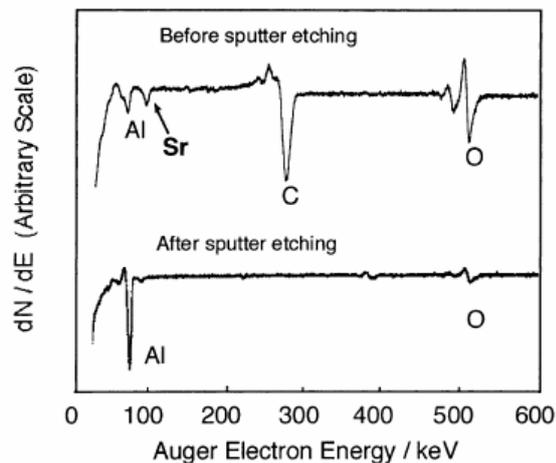


รูปที่ 2.28 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดเกรนของโลหะผสมต่างๆ [24]

Horikawa และคณะ [26] ศึกษาผลของการเกิดการแตกร้าระหว่างเกรนที่เกิดจากธาตุมลทินปริมาณเล็กน้อยในโลหะผสม Al-5.5%Mg เมื่อผสมธาตุ Na, Ca และ Sr ในปริมาณต่างๆแล้วทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าทั้งธาตุ Na, Ca และ Sr ที่ผสมในปริมาณตั้งแต่ 2 ppm ขึ้นไปจะทำให้โลหะผสม Al-5.5%Mg เกิดการแตกร้าแบบผ่าเกรนต่อเนื่องไปจนถึงขอบเกรน ซึ่งผลของธาตุ Sr ในโลหะผสม Al-5.5%Mg เมื่อทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และเมื่อวิเคราะห์ขอบเกรนของผิวหน้าบริเวณแตกร้าด้วย SEM โดยใช้เทคนิค Auger Electron Spectroscopy: AES จะพบธาตุ Sr ที่ขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.30



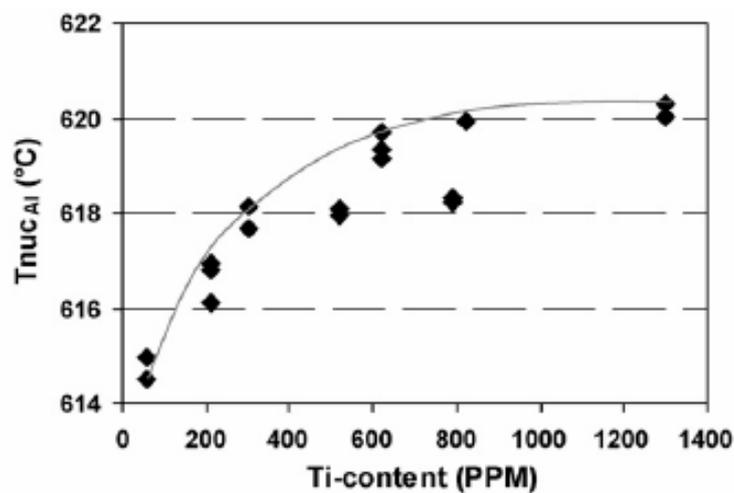
รูปที่ 2.29 ผลของธาตุ Sr ในโลหะผสม Al-5.5%Mg ที่ทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่างๆ [26]



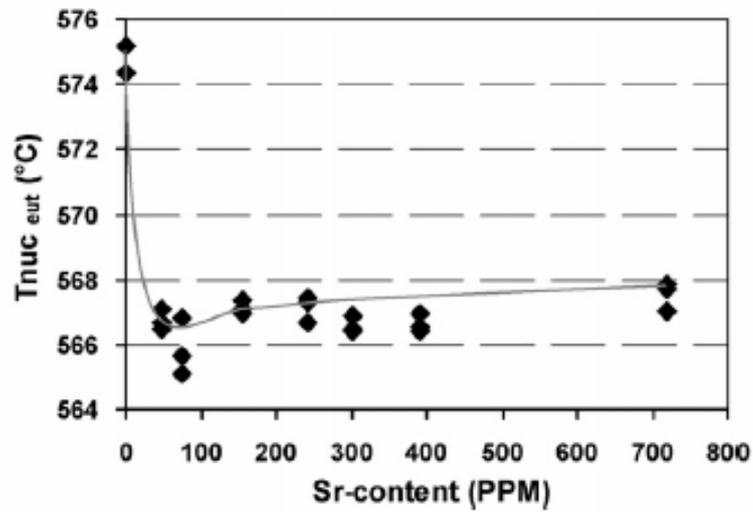
รูปที่ 2.30 ผลการวิเคราะห์ขอบเกรนของผิวหน้าบริเวณแตกร้าโดยใช้เทคนิค Auger Electron Spectroscopy ในโลหะผสม Al-5.5%Mg เมื่อผสม Sr 10 ppm [26]

Makhmudov และคณะ [27] ศึกษาผลของธาตุแมกนีเซียมและธาตุสตรอนเซียมที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียม พบว่าเมื่อผสมแมกนีเซียมไปจนถึงร้อยละ 12.0 โดยน้ำหนักจะเพิ่มความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิมระหว่าง 26.5-100 HB แต่สตรอนเซียมที่ผสมไปจนถึงร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักไม่มีผลต่อความแข็ง เมื่อนำไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย NaOH โลหะอะลูมิเนียมจะมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อผสมแมกนีเซียมร้อยละ 5.0 ถึงร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนักซึ่งความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากการตกผลึกของ Mg_2Al_3 หรือ Mg_5Al_3 เมื่อปริมาณของแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้น สำหรับสตรอนเซียมที่ผสมไปจนถึงร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักก็ช่วยทำให้โลหะอะลูมิเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

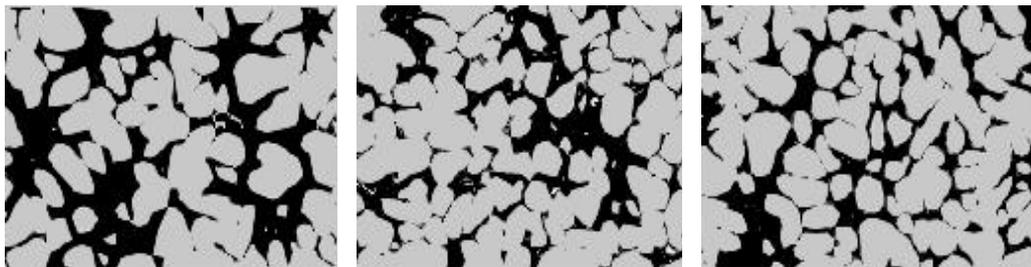
Nafisi และ Ghomashchi [28] ศึกษาการปรับสภาพเกรนละเอียดด้วยการเติมไทเทเนียมและโบรอน (Al5Ti1B) และตัดแปลงโครงสร้างด้วยสตรอนเซียม (Al10Sr) ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 สำหรับกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง พบว่าไทเทเนียมทำให้อุณหภูมิเริ่มแข็งตัวเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 6 องศาเซลเซียส เมื่อผสมในปริมาณ 1300 ppm ดังในรูปที่ 2.31 สตรอนเซียมทำให้อุณหภูมิยูเทคติกลดลงจากเดิม 8 องศาเซลเซียส เมื่อผสมในปริมาณตั้งแต่ 50 ppm ขึ้นไป ดังในรูปที่ 2.32 เมื่อช่วงอุณหภูมิของการแข็งตัวกว้างมากขึ้นจะช่วยส่งเสริมให้โครงสร้างกิ่งก้านเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างลักษณะกลมด้วยกระบวนการแพร่ซึมเมื่ออยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง ดังผลการทดลองในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.31 ผลของไทเทเนียมที่มีต่ออุณหภูมิเริ่มแข็งตัวของโลหะผสม A356 [28]



รูปที่ 2.32 ผลของสตรอนเชียมที่มีต่ออุณหภูมิเท็กติกของโลหะผสม A356 [28]



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.33 โครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งเมื่อให้ความสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 598 องศาเซลเซียส แล้วจุ่มในน้ำ (ก) A356 (ข) A356 ผสมไทเทเนียม 520 ppm และ โบรอน 73 ppm (ค) A356 ผสมสตรอนเชียม 156 ppm [28]

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของธาตุเซอร์โคเนียมและสตรอนเชียม ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด AA5083 สำหรับกระบวนการ Thixoforming รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมโลหะหลัก (Base Metal)

การวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 ตามมาตรฐานจะมี ส่วนผสม ดังตารางที่ 3.1 การเตรียมโลหะหลักทำเพื่อให้ความสะดวกในการควบคุมส่วนผสมใน ขั้นตอนการเตรียมโลหะขั้นต้น (Feed Stocks) ซึ่งทำโดยการนำอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ผสมแมกนีเซียม บริสุทธิ์ร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนักและโลหะแม้อะลูมิเนียมแมงกานีส (Al75Mn) เพื่อให้ได้แมงกานีสใน ปริมาณร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักตามที่มาตรฐานกำหนด เมื่อผสมให้ได้เกรด AA5083 จะมีส่วนผสมที่ ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission Spectrometer ดังตารางที่ 3.2 และโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มี ส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission Spectrometer ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมตามมาตรฐานของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 [8]

Component	%wt.
Al	92.4-95.6
Mg	4.0-4.9
Si	Max 0.4
Cr	0.05-0.25
Mn	0.4-1.0
Ti	Max 0.15
Cu	Max 0.1
Fe	Max 0.4
Zn	Max 0.25
Other, each	Max 0.05
Other, total	Max 0.15

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของโลหะหลัก เกรด AA5083 ที่ได้จากการเตรียม

Component	Al	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	Cr	Other
%wt.	94.370	0.069	4.543	0.006	0.200	0.752	0.005	0.003	balance

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

Component	Al	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	Cr	Other
%wt.	99.740	0.045	0.000	0.003	0.151	0.001	0.006	0.001	balance

ขั้นตอนการเตรียมโลหะหลัก มีดังต่อไปนี้

1. อุ่นเบ้าหลอมให้ร้อนแดงด้วยเตาหลอมแบบเบ้า ให้ความร้อนด้วยน้ำมันดีเซล เพื่อช่วยป้องกันการขยายตัวอย่างรวดเร็วของเบ้าหลอมและส่งผลให้เบ้าหลอมแตกเสียหาย และทำความสะอาดเบ้าหลอมด้วยฟลักซ์ชนิดไม่มีส่วนประกอบของโซเดียม
2. นำแท่งโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แมกนีเซียมบริสุทธิ์ โลหะแม่อะลูมิเนียมแมงกานีส (A175Mn) ในปริมาณที่ต้องการ และเครื่องมือที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเคลือบด้วยผงเซอร์คอนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเหล็ก อุ่นที่ปากเตาเพื่อไล่ความชื้น
3. ใส่แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ลงเบ้าหลอม จนกระทั่งหลอมละลายและมีอุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส จึงโรยฟลักซ์ ปกคลุมผิวหน้าในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักเพื่อทำความสะอาดและเป็นการป้องกันก๊าซไฮโดรเจนแพร่ลงไปใส่อะลูมิเนียมหลอมเหลวในเวลาเดียวกัน
4. ไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลาประมาณ 5 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซ 5 ลิตรต่อนาที ผ่านท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ที่เคลือบด้วยผงเซอร์คอนผสมน้ำ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และอุ่นที่ปากเตาหลอมเพื่อไล่ความชื้น ก่อนจุ่มลงไปใส่อะลูมิเนียมหลอมเหลว
5. กวาดกากโลหะ (Dross) ที่ลอยขึ้นบนผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวออกให้หมด
6. ตรวจสอบอะลูมิเนียมหลอมเหลวให้มีอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จึงทำการผสมโลหะแม่อะลูมิเนียมแมงกานีส (A175Mn) ตามปริมาณที่ต้องการลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลว
7. กวนอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นเวลาประมาณ 5 นาที เพื่อให้ส่วนผสมสม่ำเสมอ
8. ไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลาประมาณ 3 นาที
9. ลดอุณหภูมิจาก 800 องศาเซลเซียส ลงเหลือ 720 องศาเซลเซียส ทำการผสมโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ปริมาณร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนักลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลว

10. กวนอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นเวลาประมาณ 5 นาที เพื่อให้ส่วนผสมสม่ำเสมอและรักษาอุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลว ที่ 720 องศาเซลเซียส
11. ไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลาประมาณ 1 นาที แล้วกวาดกากโลหะ (Dross) ที่ลอยขึ้นบนผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวออกให้หมด
12. เทอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงเข้าเหล็กหล่อที่เคลือบด้วยกราฟไฟต์และผ่านการไล่ความชื้นด้วยเปลวไฟก๊าซ

3.2 การทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ เตรียมโลหะขึ้นต้น (Feed Stock) ศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง และศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง รายละเอียดแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเท

นำโลหะหลัก (AA5083) ที่เตรียมไว้แล้ว นำมาหลอมรวมถึงผสมธาตุสตรอนเชียมและเซอร์โคเนียม ให้ได้ส่วนผสม ดังตารางที่ 3.4 เมื่อได้ส่วนผสมตามต้องการจึงเทอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงในอุปกรณ์เตรียมโลหะขึ้นต้นซึ่งประกอบด้วยเบ้าพัก (Ladles) โลหะหลอมเหลวจำนวน 2 ชุด เบ้าพัก 1 ชุด สามารถจ่ายโลหะหลอมเหลวได้ 4 ช่องทาง รางเทที่มีความยาว 450 มิลลิเมตร ทำมุมเอียง 60 องศา และโมลด์เหล็กกล้า อุปกรณ์เตรียมโลหะขึ้นต้นแสดงดังรูปที่ 3.1 และก่อนนำอุปกรณ์เตรียมโลหะขึ้นต้นซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนไปใช้งานจะเคลือบด้วยผงเซอร์คอนผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมและอุ่นในเตาอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเพื่อไล่ความชื้นและลดความแตกต่างของอุณหภูมิ

ขั้นตอนการเตรียมโลหะขึ้นต้น มีดังต่อไปนี้

1. อุ่นเบ้าหลอมให้ร้อนแดงด้วยเตาหลอมแบบขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 12 กิโลวัตต์ ของบริษัท LAVA รุ่น 010-4 เพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 200 องศาเซลเซียส จนถึง 800 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการขยายตัวของเบ้าหลอมและส่งผลให้เบ้าหลอมแตกเสียหายได้ ขณะเดียวกันนำแท่งโลหะหลัก (AA5083) โลหะแม่อะลูมิเนียมเซอร์โคเนียม (Al10Zr) และโลหะแม่อะลูมิเนียมสตรอนเชียม (Al10Sr) แมกนีเซียมบริสุทธิ์ ตามปริมาณที่ต้องการ และเครื่องมือต่างๆที่เคลือบด้วยผงเซอร์คอนผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเหล็ก อุ่นที่ปากเตาเพื่อไล่ความชื้น
2. ไล่โลหะหลัก (AA5083) ลงเบ้าหลอมจนกระทั่งหลอมละลายและมีอุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส โรยฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้าในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก เพื่อป้องกันก๊าซ

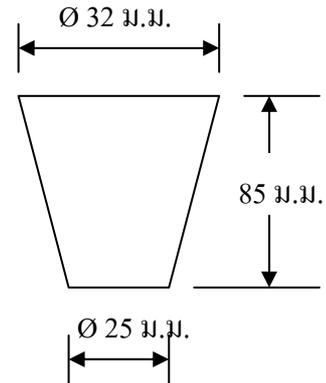
- ไฮโดรเจนแพร่ลงไปใอะลูมิเนียมหลอมเหลวและทำความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วย
3. ไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลาประมาณ 2 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซ 5 ลิตรต่อนาที ผ่านท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยผงเซอร์คอนผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม และอุ่นที่ปากเตาหลอมให้ร้อนก่อนจุ่มลงไปใอะลูมิเนียมหลอมเหลว
 4. กวาดกากโลหะ (Dross) ที่ลอยขึ้นบนผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวออกให้หมด
 5. ตรวจสอบอะลูมิเนียมหลอมเหลวให้มีอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ผสมโลหะผสมในปริมาณที่ต้องการดังตารางที่ 3.4 กรณีโลหะขึ้นต้นหมายเลข 1 (Alloys No. 1) ให้ผสมโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ให้ได้ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก เพื่อชดเชยการสูญเสีย กวนโลหะหลอมเหลวประมาณ นาที เพื่อให้ส่วนผสมสม่ำเสมอ ไล่ก๊าซไฮโดรเจนให้ออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยก๊าซอาร์กอน ประมาณ 5 วินาที กรณีโลหะขึ้นต้นหมายเลข 2 และ 3 (Alloys No. 2, 3) เมื่อผสมโลหะแม่อะลูมิเนียมเซอร์โคเนียมและโลหะขึ้นต้นหมายเลข 4 และ 5 (Alloys No. 4, 5) เมื่อเติมโลหะแม่อะลูมิเนียมสตรอนเชียมแล้วให้เติมโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ให้ได้ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักเพื่อชดเชยการสูญเสีย กวนอะลูมิเนียมหลอมเหลวและไล่ก๊าซไฮโดรเจนด้วยก๊าซอาร์กอน ในกรณีโลหะขึ้นต้นหมายเลข 6 ถึงหมายเลข 9 (Alloys No. 6-9) ให้ผสมโลหะแม่อะลูมิเนียมเซอร์โคเนียมและตามด้วยโลหะแม่อะลูมิเนียมสตรอนเชียม จึงผสมโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ให้ได้ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักเพื่อชดเชยการสูญเสีย จากนั้นจึงกวนอะลูมิเนียมหลอมเหลวและไล่ก๊าซไฮโดรเจนด้วยก๊าซอาร์กอน
 6. เทอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่มีส่วนผสมตามที่ต้องการแล้วที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ลงเข้าพัก (Ladles) ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จึงจ่ายโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทเข้าสู่โมลด์เหล็กกล้า ปล่อยให้โลหะแข็งตัวจึงแกะออกจากโมลด์



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์เตรียมโลหะขึ้นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) ลักษณะโลหะขึ้นต้นเมื่อแกะออกจากโมลด์ (ข) ขนาดโลหะขึ้นต้นสำหรับทดลอง

3.2.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ถึงกระบวนการ Thixoforming ที่ว่าทำด้วยการนำโลหะขึ้นต้น (Feed Stock) ให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง ซึ่งเรียกว่า “Slurry” เพื่อให้ทำโครงสร้างเกรนเปลี่ยนเป็นลักษณะกลม (Globular) แล้วจึงป้อนโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งการทดสอบอย่างง่ายเพื่อหาสภาพที่เหมาะสมของ Slurry ทำได้ด้วยการทดสอบตัด (Cut Test) สำหรับปริมาณสัดส่วนของแข็ง (Fraction of Solid) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตโลหะในสภาพกึ่งของแข็ง โดยทั่วไปปริมาณสัดส่วนของแข็งจะไม่เกิน 0.60 [15] ซึ่งปริมาณสัดส่วนของแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง สำหรับการหาปริมาณสัดส่วนของแข็งสามารถหาได้หลายวิธี เช่น Thermo-Calc Software, Differential Scanning Calorimeter:DSC และสมการของ Scheil Equation เป็นต้น

การศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งของกระบวนการ Thixoforming ในงานวิจัยนี้ การเตรียม Slurry ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อเลือกระดับอุณหภูมิและเวลาดำเนินการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด AA5083 นี้มีช่วงอุณหภูมิของการแข็งตัวที่เส้น Liquidus ที่ 638 องศาเซลเซียส และเส้น Solidus ที่ 574 องศาเซลเซียส [8] จึงทดลองให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 600, 610 และ 620 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที ไม่สามารถทำการทดสอบตัดได้ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 15 นาที ไม่สามารถทดสอบตัดได้ แต่สามารถทดสอบตัดได้เมื่อค้างโลหะเป็นเวลา 30 นาที ทุกๆส่วนผสม ดังตัวอย่างผลการทดสอบตัดโลหะผสม AA5083 แสดงในรูปที่ 3.3 นอกจากนี้ยังได้ทดลองขึ้นรูปโลหะทุกส่วนผสมในแม่พิมพ์เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ทั้งหมด ตัวอย่างผลการทดลองขึ้นรูปโลหะผสม AA5083 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับการทดลองให้

ความร้อนที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เมื่อค้ำโลหะเป็นเวลา 15 นาที โลหะได้เกิดการหลอมละลายไปก่อนแล้ว

ดังนั้นในการทดลองจึงได้กำหนดอุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้ำโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที เพื่อศึกษาผลของเวลาค้ำโลหะที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง และการศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็งจะใช้อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้ำโลหะเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของโลหะขึ้นต้น

Alloy No.	AA5083 (Al + 4.5%Mg + 0.7%Mn)	Zr (%wt.)		Sr (%wt.)	
		0.04	0.08	0.02	0.04
1	X				
2	X	X			
3	X		X		
4	X			X	
5	X				X
6	X	X		X	
7	X	X			X
8	X		X	X	
9	X		X		X



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 การทดสอบตัดโลหะผสม AA5083 เมื่อผ่านการให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส เวลาค้ำโลหะที่ (ก) 15 นาที (ข) 30 นาที



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นทดสอบของโลหะผสม AA5083 ที่ผ่านการขึ้นรูปในสภาพกึ่งของแข็ง

3.2.2.1 การศึกษาผลของเวลาค้างโลหะที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง

ทำโดยการให้ความร้อนกับโลหะขึ้นต้นด้วยเตาอบแบบความต้านทานไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที นำโลหะออกจากเตาอบแล้วจุ่มลงในน้ำ นำไปวิเคราะห์ผลของเวลาค้างโลหะที่มีต่อลักษณะความกลมและขนาดเกรนด้วยภาพโครงสร้างจุลภาค

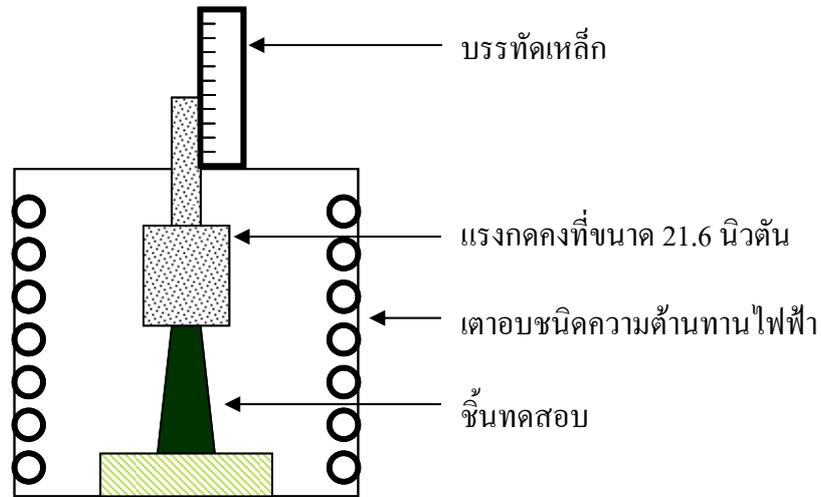
3.2.2.2 การศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง

ทำโดยการให้ความร้อนกับโลหะขึ้นต้นด้วยเตาอบแบบความต้านทานไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 30 นาที นำโลหะออกจากเตาอบแล้วจุ่มลงในน้ำ นำไปวิเคราะห์ผลของธาตุผสมที่มีต่อลักษณะความกลมและขนาดเกรนด้วยภาพโครงสร้างจุลภาค

3.2.3 การศึกษาผลของธาตุผสมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง

การทดสอบพฤติกรรมการไหล (Rheological Test) ในสภาพกึ่งของแข็งทำเพื่อหาค่าความหนืด (viscosity) ของ Slurry ซึ่ง Slurry ที่มีค่าความหนืดต่ำจะทำให้มีความสามารถในการเข้าเต็มเต็มในแม่พิมพ์ได้ดี โดยเฉพาะบริเวณที่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังทำให้ความต้องการแรงสำหรับขึ้นรูปต่ำลงอีกด้วย ความหนืดของ Slurry จะมีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของแข็งลดลง อนุภาคเฟสของแข็งมีขนาดเล็ก มีรูปร่างกลมและการกระจายตัวสม่ำเสมอ [4]

การทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง ในงานวิจัยนี้ ทำโดยการให้ความร้อนกับโลหะขึ้นต้นด้วยเตาอบแบบความต้านทานไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และกดโลหะขึ้นต้นด้วยแรงกดคงที่ (Dead Weight) ขนาด 21.6 นิวตัน [4] ทำจากแท่งเหล็กกล้าคาร์บอน บันทึกระยะเวลาเวลาที่เหลือของโลหะทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 10 นาที นำไปวิเคราะห์ผลของธาตุผสมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉื่อยและเวลาให้แรงกดคงที่ ลักษณะอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะอุปกรณ์ทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง

3.3 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

วิธีวิเคราะห์ผลการทดลองจะทำการวิเคราะห์ทางความร้อน วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค EDS Mapping ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อนำไปหาระดับความกลมและขนาดเกรนของโครงสร้างอัลฟาอะลูมิเนียม (α -Al) ด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ และวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉื่อยและเวลาให้แรงกดคงที่ ซึ่งรายละเอียดวิธีวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

3.3.1.1 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

1. นำชิ้นงานทดสอบมาขัดด้วยกระดาษทรายสายพานเบอร์ 40 - grit เพื่อปรับผิวชิ้นทดสอบ
2. ขัดกระดาษทรายเบอร์ 120, 320, 600, 800, 1000 และ 1200 - grit ตามลำดับ
3. ขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาดร่วมกับผงเพชรที่ผสมกับสารหล่อลื่น (Diamond Lubricant) โดยใช้ผงเพชรขนาด 6 และ 1 ไมครอนตามลำดับ
4. นำมากัดผิวหน้าด้วยสารละลาย Keller's Agent เป็นเวลา 10 ถึง 30 วินาที แล้วล้างให้สะอาดด้วยน้ำ และล้างด้วยแอลกอฮอล์จากนั้นใช้ลมร้อนเป่าที่ผิวหน้าชิ้นงานทดสอบให้แห้งสนิท

3.3.1.2 การเตรียมสารละลาย Keller's Agent

สารละลายชนิดนี้ใช้เพื่อกัดผิวหน้าผิวโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure) มีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. เตรียมน้ำกลั่น 190 มิลลิลิตรใน volumetric flask
2. เติมกรดไนตริก 5 มิลลิลิตร
3. เติมกรดไฮโดรคลอริก 3 มิลลิลิตร
4. เติมกรดไฮโดรฟลูออริก 2 มิลลิลิตร
5. กวนสารละลายจนเข้ากันเนื้อเดียวกัน

3.3.1.3 การวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept

ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคของชิ้นทดสอบ จะนำมาวิเคราะห์และวัดขนาดเกรนด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ ซึ่งวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept ตามมาตรฐาน ASTM E112-96 โดยมีลักษณะรูปแบบเส้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) แต่ละเส้นจะมีความยาวที่แตกต่างกันดังนี้ เส้นแนวขนานและเส้นในแนวตั้งจะมีความยาว 100 มิลลิเมตร และเส้นทแยงมุมมีความยาว 150 มิลลิเมตร

การนับจุดที่เกิดบนเส้นตรงจะแสดงในรูปที่ 3.6 (ข) โดยวิธีการนับแต่ละจุดจะแตกต่างกันเมื่อนับแล้วจะได้ขนาดเกรนออกมาเป็นค่าเฉลี่ย การนับจะพิจารณาจากจุดตัดที่ลากผ่านเกรนดังต่อไปนี้

- หมายเลข 1 เส้นตรงลากผ่านขอบเกรนมีจุดตัดเกิดขึ้นนับ 1
- หมายเลข 2 เส้นตรงลากผ่านรอยต่อของเกรน 3 เกรน นับ 1.5
- หมายเลข 3 เส้นตรงลากสัมผัสส่วนโค้งของขอบเกรนนับ 1
- หมายเลข 5 ปลายสุดของเส้นตรงสิ้นสุดที่ขอบเกรนนับ 0.5
- หมายเลข 5 ปลายของเส้นตรงสิ้นสุดที่กึ่งกลางเกรนนับ 0
- หมายเลข 6 เส้นตรงลากผ่านทะเลเพลิงที่ 2 นับ 0

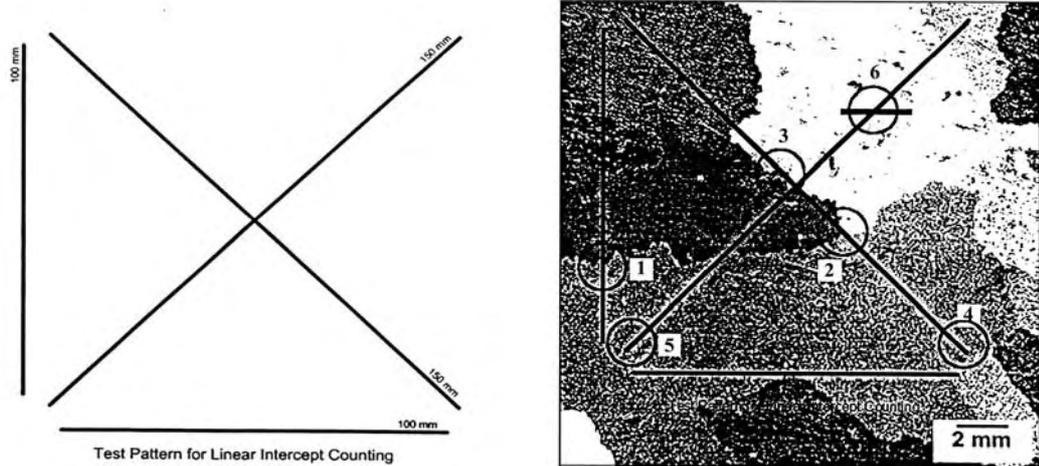
นำผลที่ได้จากการนับจุดตัดมาเข้าสมการที่ 3.1

$$N_v = \left(\frac{n_n + n_1 + n_2}{500} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ N_v คือ ค่าเฉลี่ยของจุดตัดที่คำนวณได้จากเส้นตรง 3 เส้น

- n_n คือ จำนวนจุดตัดที่เกิดขึ้นบนเส้นแนวตั้งฉาก
- n_1 คือ จำนวนจุดตัดที่เกิดขึ้นบนเส้นขนานนอน
- n_2 คือ จำนวนจุดตัดที่เกิดขึ้นบนเส้นทแยงมุมทั้ง 2 เส้น

การประมวลผลของโปรแกรมประมวลผลภาพจะนับจุดที่เกิดบนเส้นตรงทั้ง 3 เส้น แล้วคำนวณตามสมการที่ 3.1 แล้วแสดงผลเป็นขนาดเกรน (Grain Size No.) จากนั้นนำขนาดเกรนที่ได้ไปคำนวณขนาดเกรนเฉลี่ยของภาพนั้นๆ ด้วยตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) แบบเส้นมาตรฐานของการวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept
(ข) ตัวอย่างการวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept

3.3.1.4 การวัดระดับความกลมของเกรน

ภาพถ่ายโครงสร้างในระดับจุลภาคของชิ้นทดสอบ จะนำมาวิเคราะห์และวัดระดับความกลมของเกรนด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ ซึ่งแสดงด้วยค่า Shape Factor ระดับความกลมของเกรนจะสมบูรณ์ที่สุดเมื่อ Shape Factor มีค่า = 1 โดย Shape Factor หาได้จากสมการที่ 3.2 [15] ภาพถ่ายที่ได้จะถ่ายในตำแหน่งกึ่งกลางของรัศมี จำนวน 3 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งทำมุม 120 องศา ต่อ 1 ชิ้นทดสอบ จากทั้งหมด 3 ชิ้นทดสอบของชุดการทดลอง

$$\text{Shape Factor} = \frac{P^2}{4\pi A \alpha} \tag{3.2}$$

เมื่อ P = perimeter คือ ความยาวของเส้นรอบรูปของเกรนอัลฟาอะลูมิเนียม
 A_α = area of α -Al คือ พื้นที่ของเกรนอัลฟาอะลูมิเนียม

3.3.2 วิธีวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง

นำระยะความสูงที่เหลือของแท่งโลหะขึ้นต้นทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 10 นาที นำไปหาค่าความเครียดจากสมการที่ 3.3 [4] โดยความเครียดของการทดลองจะเป็นค่าเฉลี่ยแล้วคูณด้วย 100 เพื่อให้เป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉลี่ยและเวลาให้แรงกดคงที่

ความเครียดหาได้จากสมการที่ 3.3 มีดังนี้

$$E = 1 - \frac{H}{H_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ E = engineering strain คือ ความเครียด (เปอร์เซ็นต์)

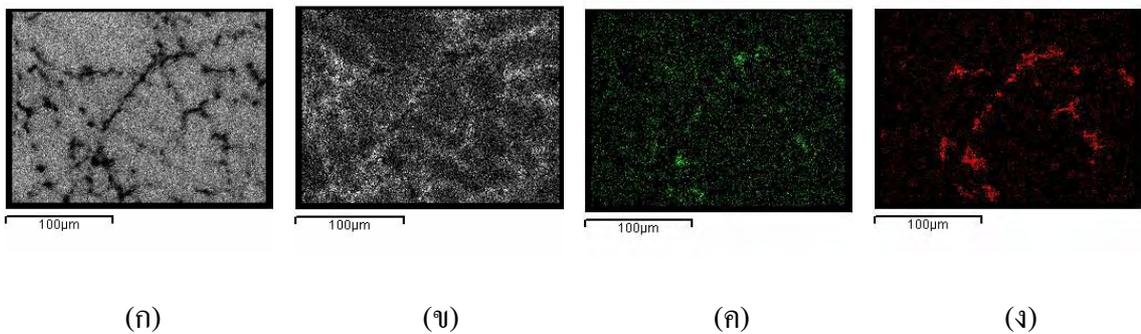
H = instantaneous billet high คือ ระยะความสูงที่เหลือของแท่งโลหะขึ้นต้นทุกๆ 1 นาที (มิลลิเมตร)

H₀ = initial billet high คือ ระยะความสูงของแท่งโลหะขึ้นต้นก่อนกดด้วยแรงคงที่งานวิจัยนี้ความสูงของแท่งโลหะขึ้นต้น กำหนดที่ 85 มิลลิเมตร

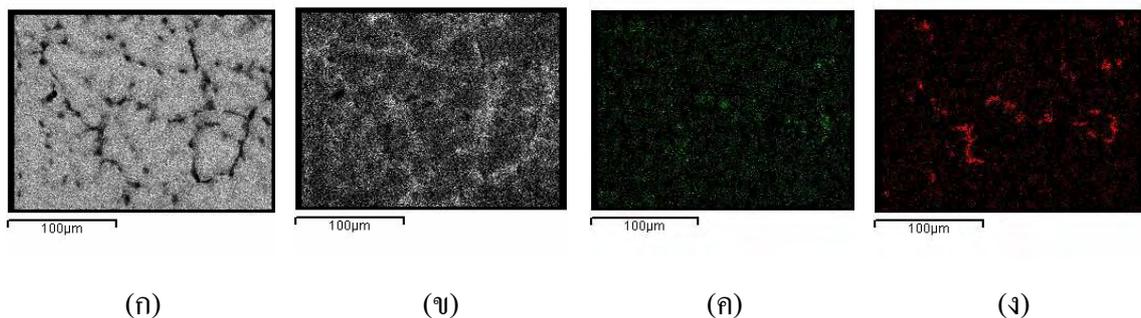
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค EDS Mapping

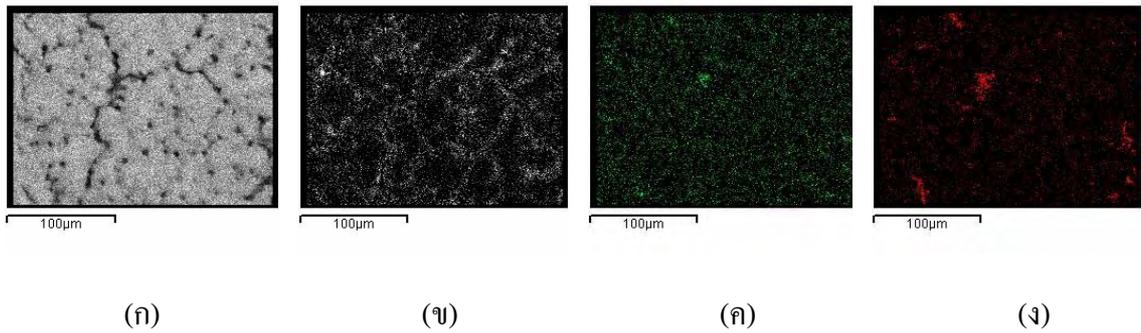
เมื่อนำโลหะที่ส่วนผสมต่างๆในสภาพหล่อไปทำการวิเคราะห์หาธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมในโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometer:EDS Mapping จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 5800 ใช้กระแสไฟฟ้าขนาดแรงเคลื่อน 20 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า ผลวิเคราะห์ไม่พบทั้งธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียม เนื่องจากธาตุทั้ง 2 ผสมเข้าไปในปริมาณน้อยมาก ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4



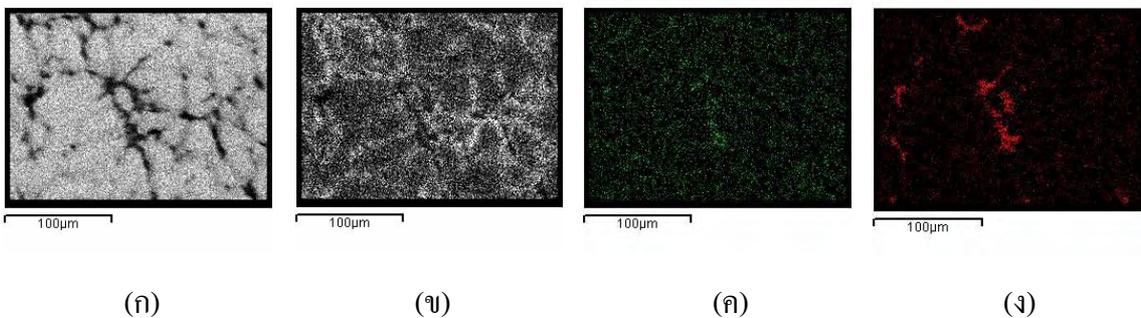
รูปที่ 4.1 EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก



รูปที่ 4.2 EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก



รูปที่ 4.3 EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก
(ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก



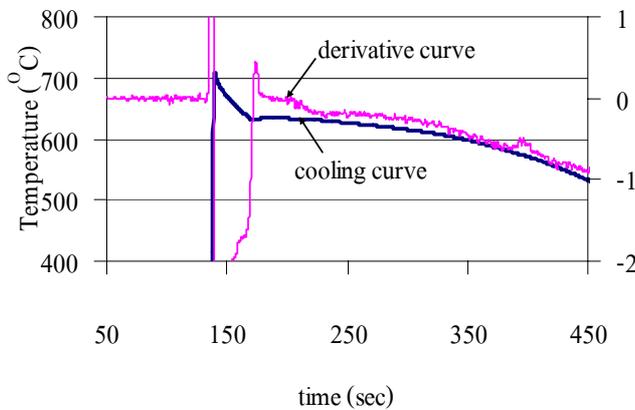
รูปที่ 4.4 EDS Mapping ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก
ร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม
(ค) แมงกานีส (ง) เหล็ก

4.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน

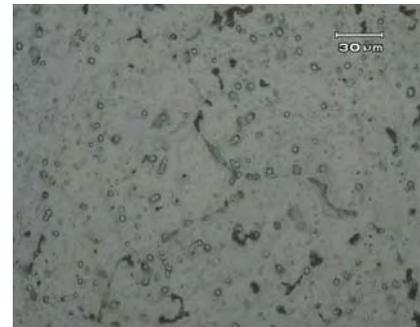
การวิเคราะห์ทางความร้อนกระทำเพื่อหาพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะที่ส่วนผสมต่างๆ โดยทำการวิเคราะห์กับโลหะผสม AA5083 โลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก โลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก และโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8 ไม่พบการเกิดขึ้นของเฟสอื่น อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัวและอุณหภูมิช่วงการแข็งตัวไม่เปลี่ยนแปลงไปจากโลหะผสม AA5083 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการแข็งตัวของโลหะผสมต่างๆ

โลหะผสม	อุณหภูมิเริ่มการแข็งตัว (°C)	อุณหภูมิตั้งการแข็งตัว (°C)	อุณหภูมิช่วงการแข็งตัว (°C)
AA5083	637	573	64
AA5083 + 0.08%Zr	631	571	60
AA5083 + 0.04%Sr	631	568	63
AA5083 + 0.08%Zr + 0.04%Sr	630	569	61

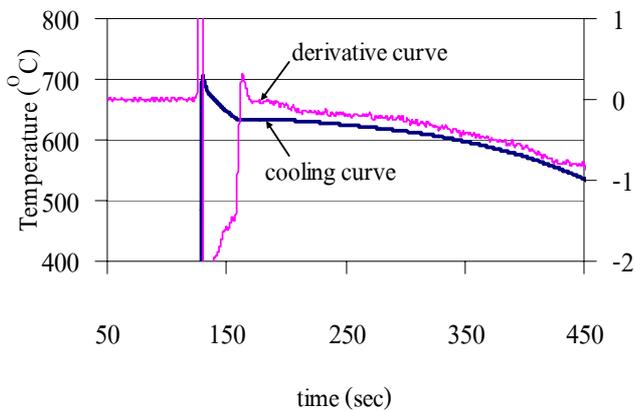


(ก)

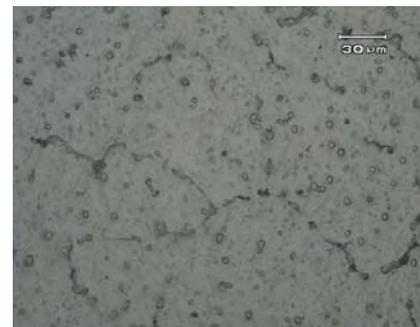


(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของโลหะผสม AA5083

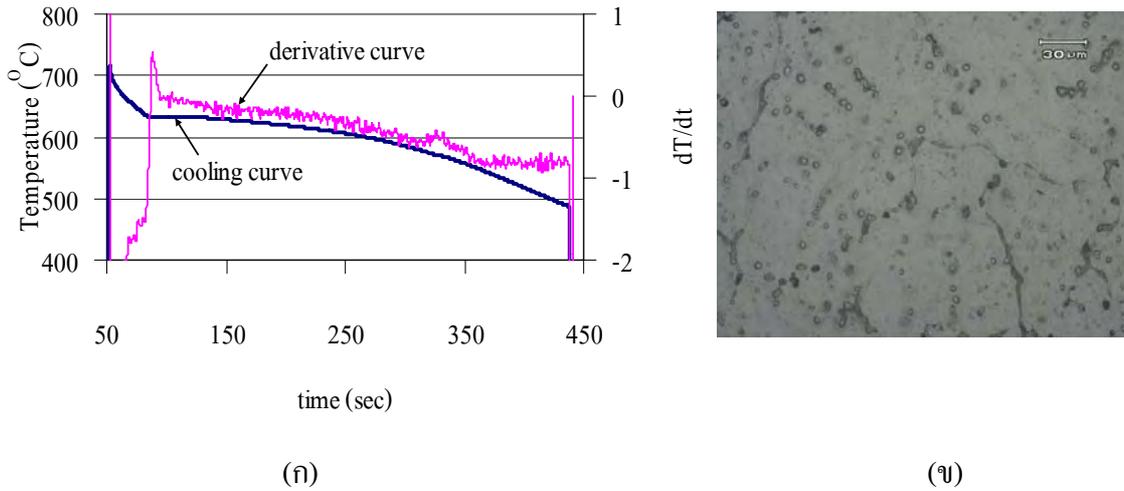


(ก)

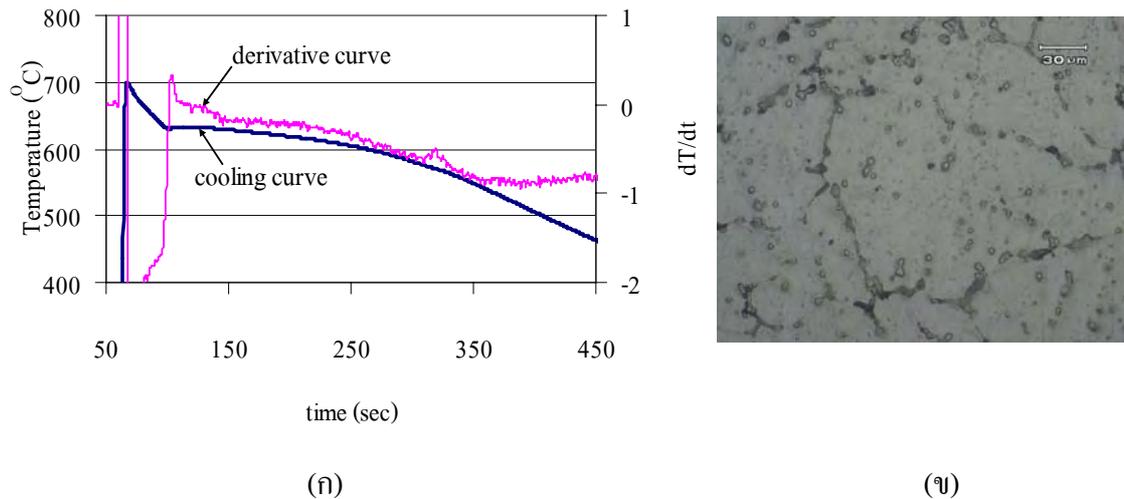


(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก



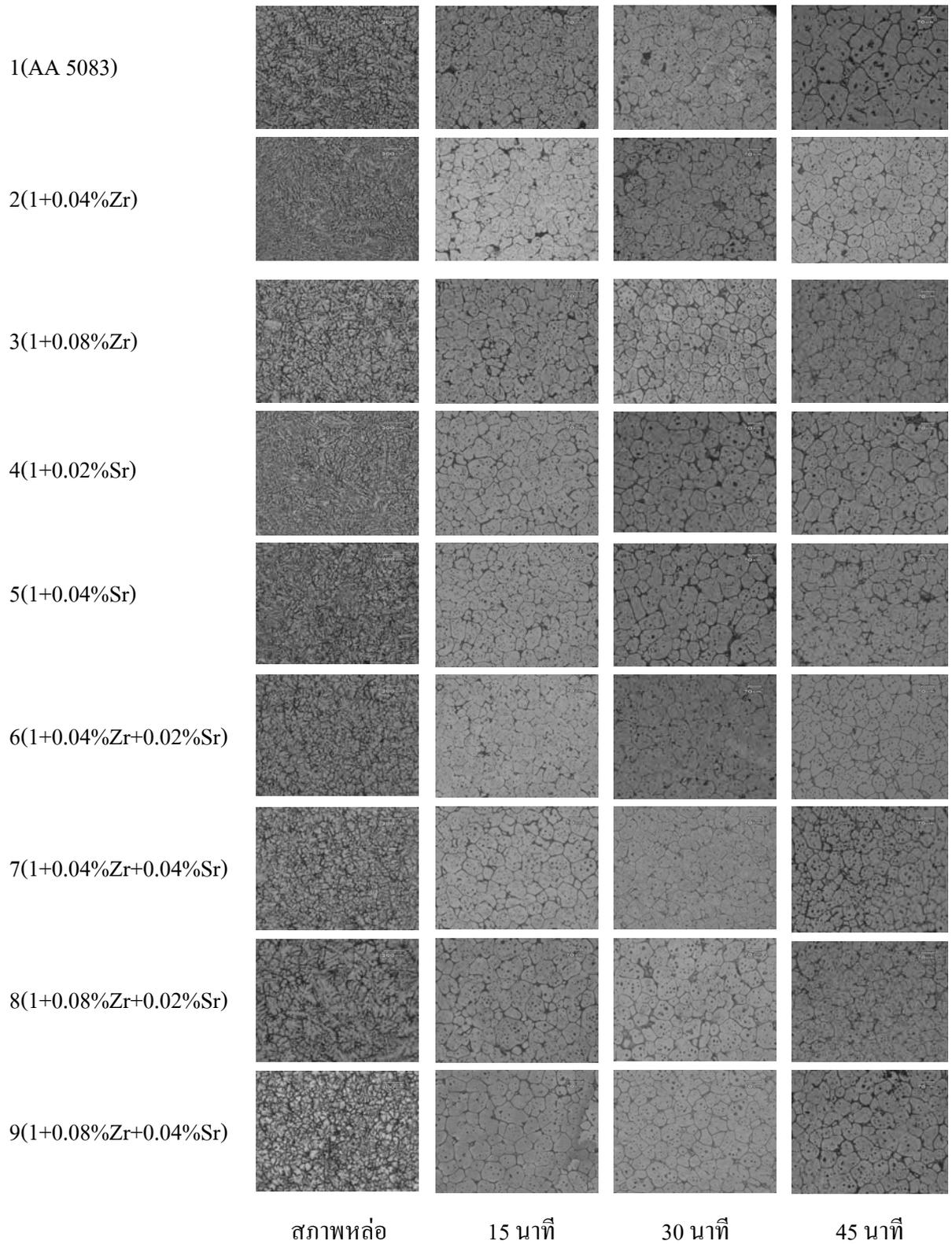
รูปที่ 4.7 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุสตรอนเทียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.8 (ก) cooling curve และ derivative curve (ข) โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเทียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก

4.3 ผลของเวลาดำโลหะที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง

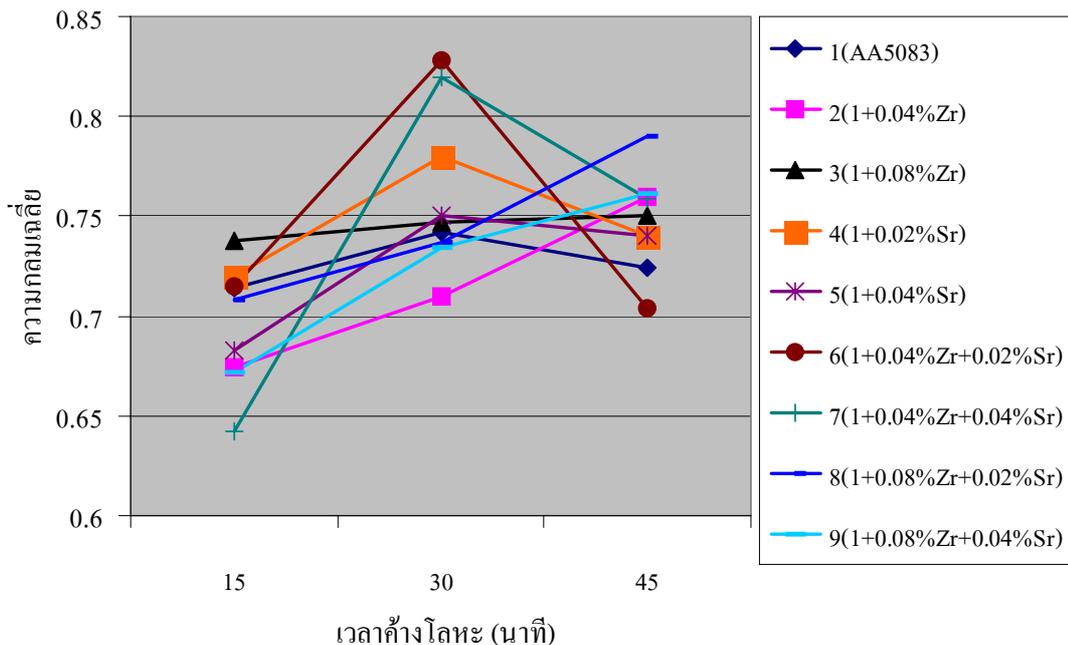
เมื่อนำโลหะทุกๆส่วนผสมให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที จะทำให้โครงสร้างเกรนเปลี่ยนแปลงลักษณะจากโครงสร้างกิ่งก้าน (Dendrite) ไปสู่โครงสร้างลักษณะกลม (Globular) ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากกลไกการแพร่ซึม [15] ในรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะโครงสร้างเกรนของโลหะผสมต่างๆ ทั้งในสภาพหล่อและเมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มในน้ำ



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมต่างๆ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

4.3.1 ระดับความกลมของเกรน

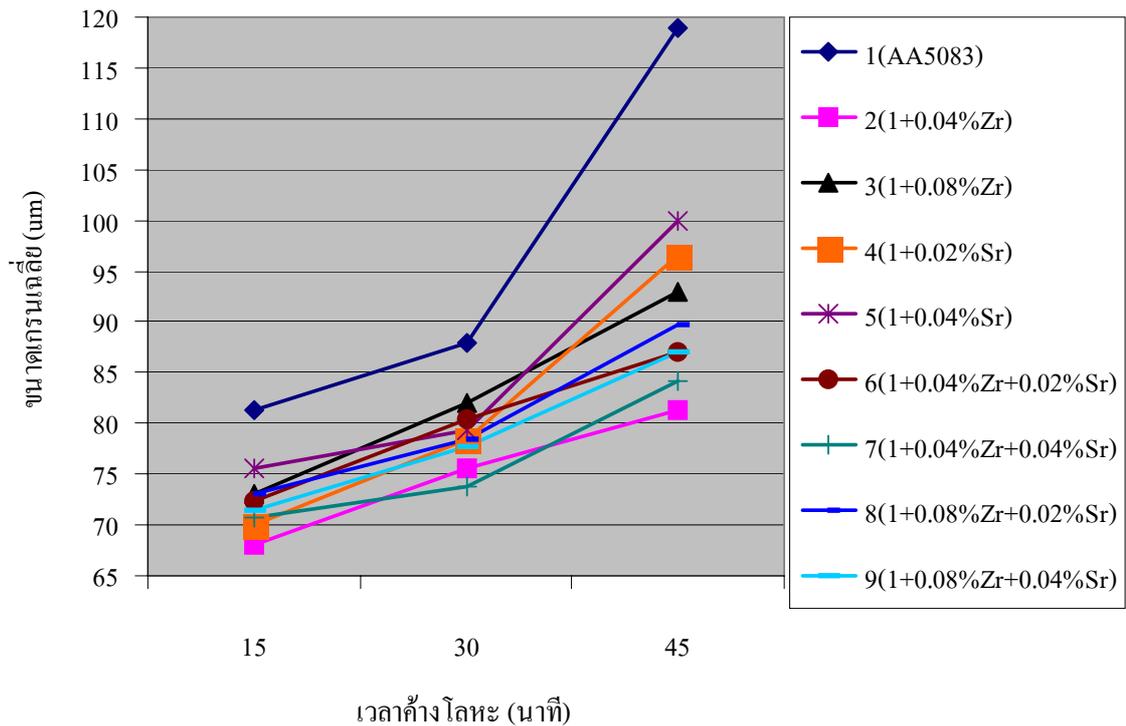
เมื่อนำโลหะต่างๆ ส่วนผสม ให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้ำโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วทำให้เย็นตัวโดยเร็วด้วยการจุ่มในน้ำ พบว่าเกรนในสภาพหล่อที่ได้จากการเทโลหะหลอมเหลวจากเบ้าพักที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ให้ไหลผ่านรางเท ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างกิ่งก้าน (Dendrite) เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปสู่โครงสร้างลักษณะกลม (Globular) เมื่อค้ำโลหะเป็นเวลา 15 และ 30 นาที จะทำให้ระดับความกลมเฉลี่ยของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และระดับความกลมเฉลี่ยของเกรนจะลดลงเมื่อค้ำโลหะที่ 45 นาที ดังรูปที่ 4.10 ยกเว้นโลหะผสม AA5083 ที่ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (โลหะผสมหมายเลข 2) และโลหะผสม AA5083 ที่ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (โลหะผสมหมายเลข 8 และ 9) ที่มีระดับความกลมเฉลี่ยของเกรนเพิ่มขึ้น เมื่อค้ำโลหะที่ 45 นาที



รูปที่ 4.10 ความกลมเฉลี่ยของเกรนของโลหะผสมต่างๆ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้ำโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

4.3.2 ขนาดเกรน

เมื่อนำโลหะต่างๆ ส่วนผสม ให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้ำโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วทำให้เย็นตัวโดยเร็วด้วยการจุ่มในน้ำ พบว่าโลหะต่างๆ ส่วนผสมขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เชื่อว่าเกิดจากกระบวนการแพร่ซึม [15] โดยโลหะผสมหมายเลข 1(AA 5083) ขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่ามากกว่าโลหะผสมอื่นๆ ทุกๆ เวลาค้ำโลหะ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ขนาดเกรนเฉลี่ยของโลหะผสมต่างๆ เมื่อให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้ำโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

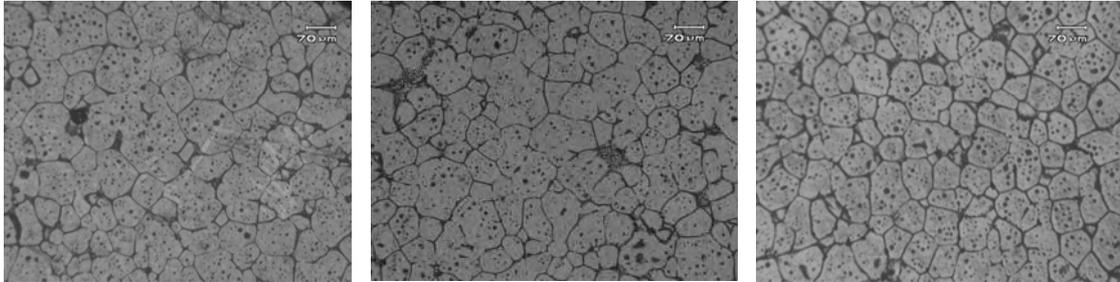
4.4 ผลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคในสภาพกึ่งของแข็ง

ผลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคจะศึกษาในกรณีให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และค้ำโลหะเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำให้เย็นตัวโดยเร็วด้วยการจุ่มในน้ำ เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่สามารถทดสอบตัดและขึ้นรูปโลหะต่างๆ ส่วนผสมได้

4.4.1 ผลของธาตุเซอร์โคเนียม

จากการทดลองพบว่า การผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.00, 0.04 และ 0.08 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA5083 ทำให้ระดับความกลมเฉลี่ยของเกรนไม่เปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0.74, 0.75 และ

0.71 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และเมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยลดลงจาก 88 μm เป็น 75 μm และเมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก เป็น 82 μm ซึ่งนับว่าไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.14

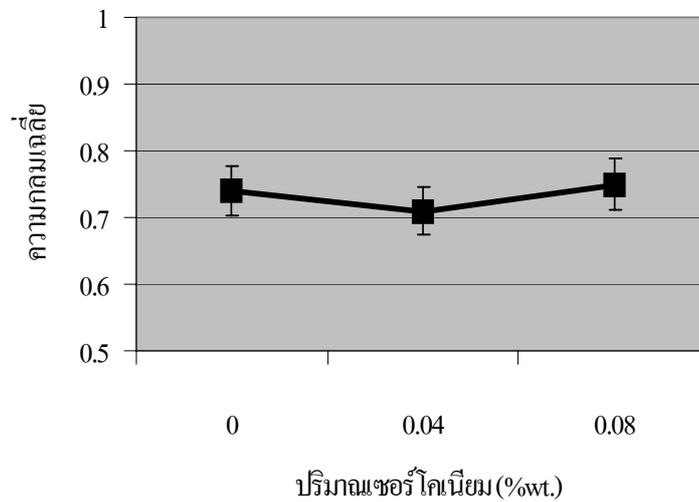


(ก)

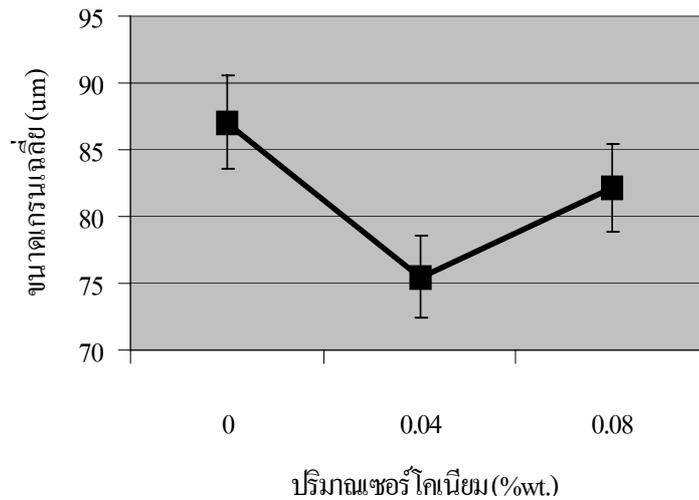
(ข)

(ค)

รูปที่ 4.12 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ (ก) 0.00%Zr (ข) 0.04%Zr (ค) 0.08%Zr



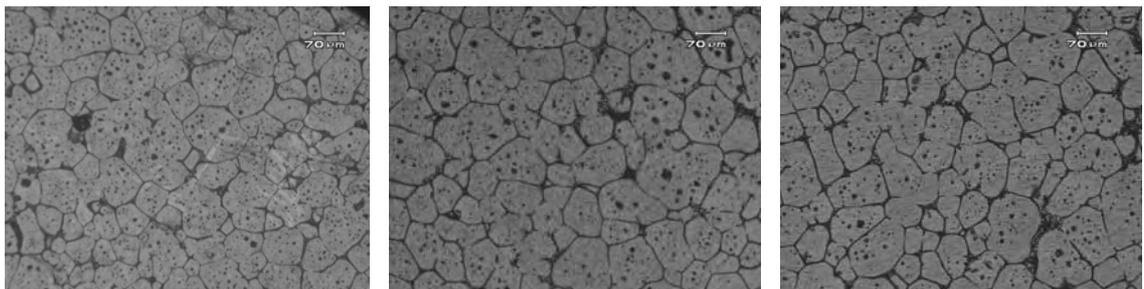
รูปที่ 4.13 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมต่อระดับความกลมเฉลี่ยของเกรน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ



รูปที่ 4.14 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

4.4.2 ผลของธาตุสตรอนเชียม

จากการทดลองพบว่า การผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.00, 0.02 และ 0.04 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA5083 ทำให้ระดับความกลมเฉลี่ยของเกรนไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0.74, 0.76 และ 0.75 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก ทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยลดลงจาก 88 μm เป็น 78 μm และเมื่อผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 79 μm ซึ่งนับว่าขนาดเกรนไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.17

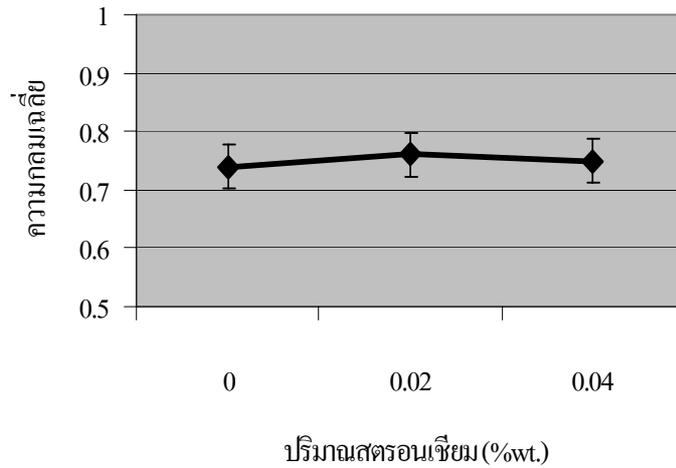


(ก)

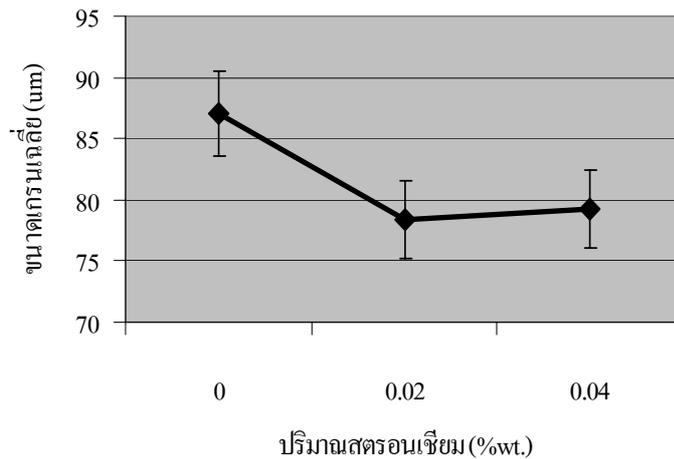
(ข)

(ค)

รูปที่ 4.15 ผลของธาตุสตรอนเชียมต่อลักษณะ โครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ (ก) 0.00%Sr (ข) 0.02%Sr (ค) 0.04%Sr



รูปที่ 4.16 ผลของธาตุสตรอนเซียมต่อระดับความกลมเกลี่ยของเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

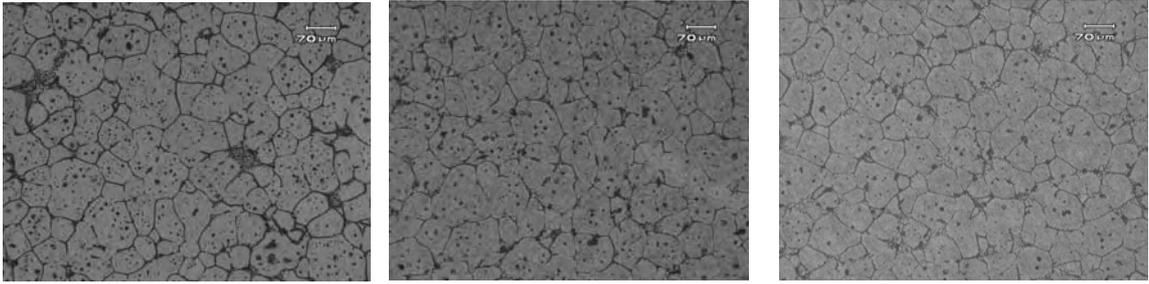


รูปที่ 4.17 ผลของธาตุสตรอนเซียมต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

4.4.3 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ร่วมกับธาตุสตรอนเซียม

ในปริมาณต่างๆ

จากการทดลองผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA5083 พบว่าระดับความกลมเกลี่ยของเกรนเพิ่มขึ้นจาก 0.71 เป็น 0.82 ทั้งร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เมื่อผสมธาตุสตรอนเซียมร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักทำให้เกรนมีขนาดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 75 µm เป็น 80 µm แต่เมื่อผสมธาตุสตรอนเซียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ทำให้เกรนมีขนาดเฉลี่ยลดลงจาก 75 µm เป็น 73 µm ดังแสดงในรูปที่ 4.20

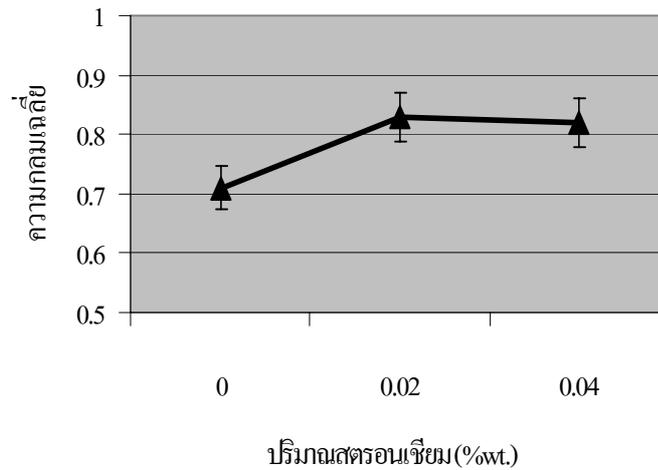


(ก)

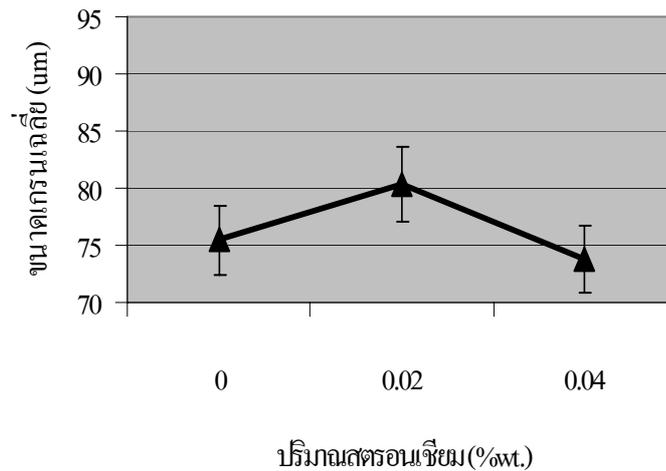
(ข)

(ค)

รูปที่ 4.18 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียมในปริมาณต่างๆ ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ (ก) 0.00%Sr (ข) 0.02%Sr (ค) 0.04%Sr



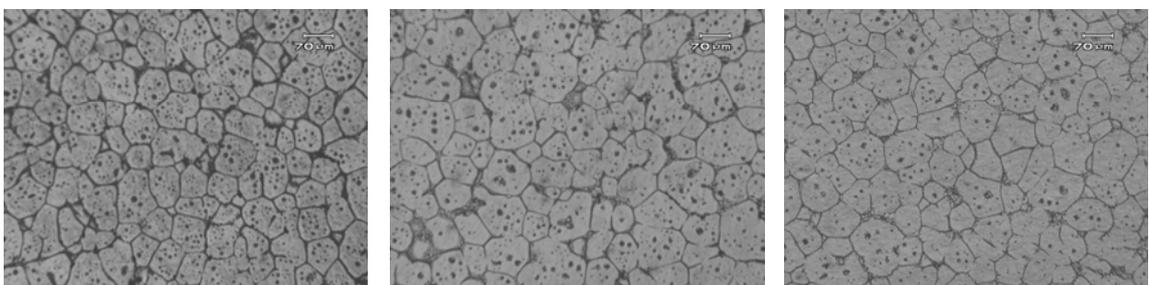
รูปที่ 4.19 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียมในปริมาณต่างๆ ต่อความกลมเกลี้ยงของเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ



รูปที่ 4.20 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียมในปริมาณต่างๆ ต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

4.4.4 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ร่วมกับธาตุสตรอนเซียมในปริมาณต่างๆ

จากการทดลองผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA5083 พบว่าธาตุสตรอนเซียมไม่ทำให้ระดับความกลมเฉลี่ยของเกรนเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 แต่ขนาดเกรนเฉลี่ยจะลดลง จาก 82 µm เป็น 78 µm และ 77 µm เมื่อผสมธาตุสตรอนเซียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.23

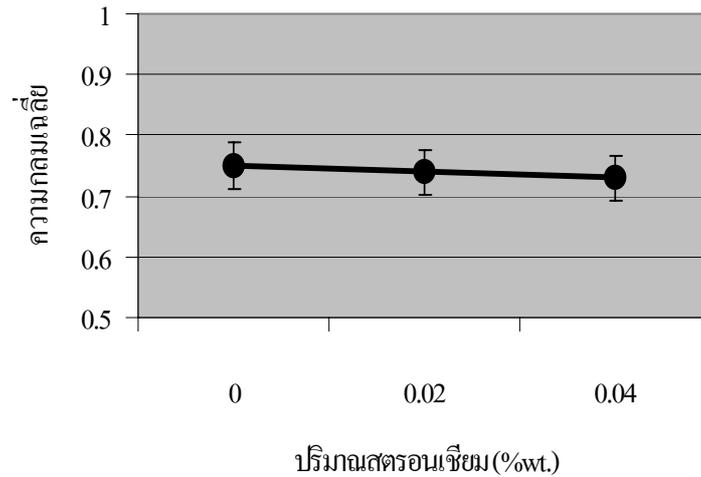


(ก)

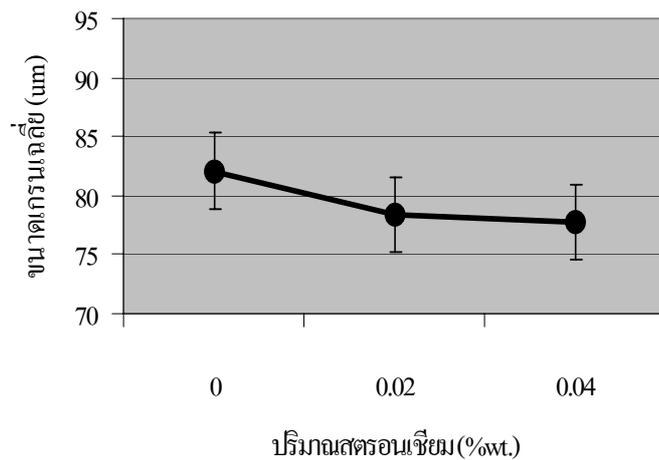
(ข)

(ค)

รูปที่ 4.21 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียมในปริมาณต่างๆ ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ



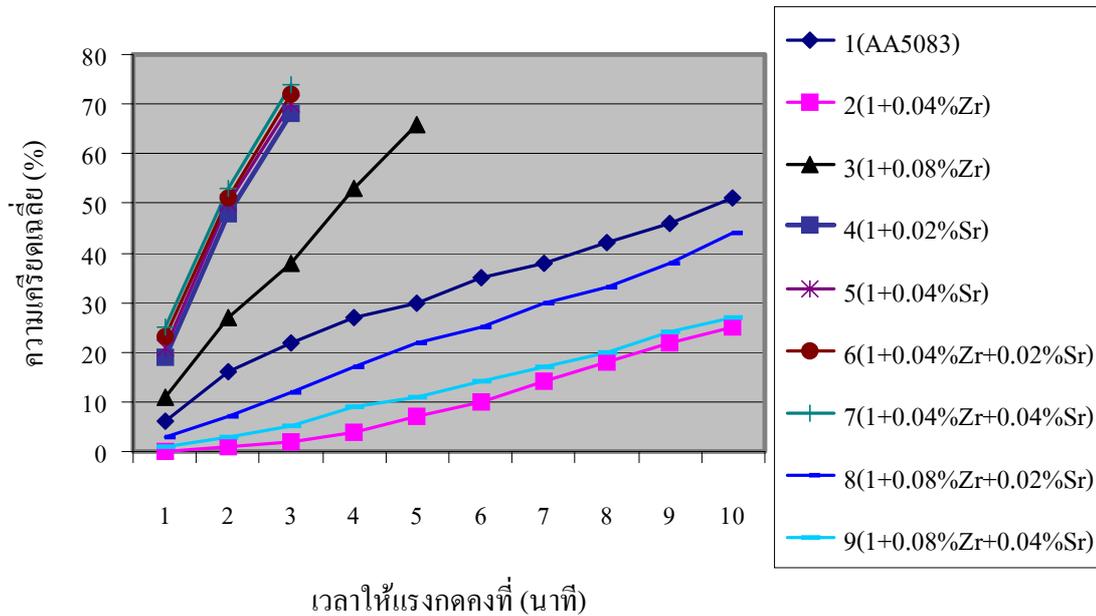
รูปที่ 4.22 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียมในปริมาณต่างๆ ต่อความกลมเฉลี่ยของเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ



รูปที่ 4.23 ผลของธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเซียม ในปริมาณต่างๆ ต่อขนาดเกรนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะ 30 นาที แล้วจุ่มในน้ำ

4.5 ผลของธาตุผสมที่มีต่อพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง

จากการทดลองให้ความร้อนกับโลหะทุกๆ ส่วนผสมที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และกดด้วยแรงคงที่ (Dead Weight) ขนาด 21.6 นิวตัน เป็นเวลา 10 นาที และแสดงผลการทดสอบด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉลี่ยและเวลาให้แรงกดคงที่ ดังในรูปที่ 4.24 จะกล่าวผลของแต่ละโลหะผสมดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดเฉลี่ยและเวลาให้แรงกดคงที่

โลหะผสมหมายเลข 1(AA5083) เมื่อเริ่มให้แรงกดคงที่โลหะจะเริ่มยุบตัวหรือเกิดความเคียดเมื่อให้แรงกดคงที่เป็นเวลา 1 นาที จะเกิดความเคียด 6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้แรงกดคงที่ต่อเนื่องจนถึง 10 นาที และเกิดความเคียดต่อเนื่องจนถึง 51 เปอร์เซ็นต์

โลหะผสมหมายเลข 2 ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA5083 จะเริ่มเกิดความเคียด 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้แรงกดคงที่เป็นเวลา 2 นาที และเกิดความเคียดต่อเนื่องช้าๆ เมื่อให้แรงกดคงที่จนถึง 10 นาที จะเกิดความเคียด 25 เปอร์เซ็นต์ ความเคียดที่เกิดขึ้นต่ำกว่าโลหะผสมหมายเลข 1

โลหะผสมหมายเลข 3 ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA5083 เมื่อให้แรงกดคงที่เป็นเวลา 1 นาที จะเกิดความเคียด 11 เปอร์เซ็นต์ และเกิดความเคียดต่อเนื่อง (เร็วกว่าโลหะผสมหมายเลข 1 และ 2) เมื่อให้แรงกดคงที่จนถึง 5 นาที จะเกิดความเคียดสูงสุด 66 เปอร์เซ็นต์

โลหะผสมหมายเลข 4 และ 5 ผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ลงในโลหะผสม AA5083 และโลหะผสมหมายเลข 6 และ 7 ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ลงในโลหะผสม AA5083 เมื่อเริ่มให้แรงกดคงที่จะเกิดความเคียดอย่างรวดเร็วและเมื่อให้แรงกดคงที่เป็น

เวลา 1 นาที จะเกิดความเครียด 20 เปอร์เซ็นต์ และเกิดความเครียดสูงสุดที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้แรงกดคงที่เป็นเวลา 3 นาที

โลหะผสมหมายเลข 8 ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA 5083 จะเกิดความเครียด 3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้แรงกดคงที่เป็นเวลา 1 นาที และเกิดความเครียดต่อเนื่องเมื่อให้แรงกดคงที่จนถึง 10 นาที ซึ่งจะเกิดความเครียดสูงสุด 44 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดที่เกิดขึ้นต่ำกว่าโลหะผสมหมายเลข 1

โลหะผสมหมายเลข 9 ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสม AA 5083 จะเกิดความเครียด 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้แรงกดคงที่เป็นเวลา 1 นาที และเกิดความเครียดต่อเนื่อง เมื่อให้แรงกดคงที่จนถึง 10 นาที ซึ่งจะเกิดความเครียดสูงสุด 27 เปอร์เซ็นต์ ความเครียดที่เกิดขึ้นมากกว่าโลหะผสมหมายเลข 2 เล็กน้อย

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉลี่ยและเวลาให้แรงกดคงที่จะเห็นได้ว่าโลหะผสมหมายเลข 4, 5, 6 และ 7 เกิดความเครียดสูงสุดที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้แรงกดคงที่เป็นเวลานาน 3 นาที ซึ่งมีพฤติกรรมการไหลดีกว่าโลหะที่ส่วนผสมอื่น พฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกันนี้ไม่ได้เกิดจากผลของธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมที่ผสมลงไป ปริมาณดังกล่าว เนื่องจากธาตุทั้งสองไม่มีผลทำให้ความกลมและขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงและธาตุทั้งสองไม่ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการแข็งตัวไม่เปลี่ยนแปลงไปจากโลหะผสม AA5083 จึงทำให้ปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นในโลหะทุกๆส่วนผสมมีปริมาณที่ไม่ต่างกัน ดังนั้นโลหะทุกๆส่วนผสมที่มีพฤติกรรมการไหลต่างกันนี้จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดจากกลไกอื่น

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองผสมธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียม ปริมาณต่างๆ ลงในโลหะผสม AA5083 แล้วนำโลหะที่ส่วนผสมต่างๆ ให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ค้างโลหะเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที ทำให้เย็นตัวโดยเร็วด้วยการจุ่มน้ำ นำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และศึกษาพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ด้วยแรงกดคงที่ ขนาด 21.6 นิวตัน เป็นเวลา 10 นาที จากการทดลองสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 เมื่อเพิ่มเวลาค้างโลหะในสภาพกึ่งของแข็งจะทำให้ความกลมของเกรนเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ 1 และทำให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาค้างโลหะต่อไปจนถึง 45 นาที ทำให้โลหะทุกส่วนมีขนาดเกรนเพิ่มขึ้น ความกลมของเกรนของโลหะผสม AA5083 ที่ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (โลหะผสมหมายเลข 2) และโลหะผสม AA5083 ที่ผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก (โลหะผสมหมายเลข 8 และ 9) มีค่าเพิ่มขึ้น โลหะผสมหมายเลขอื่นมีความกลมลดลง อาจมีสาเหตุเนื่องจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดการตกค้างของเฟสของเหลว โครงสร้างกิ่งก้านที่เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมนอกจากจะเป็นผลจากกระบวนการแพร่ซึมในขณะที่ค้างโลหะที่อุณหภูมิคงที่แล้ว ยังเกิดจากผลของแรงกระทำในขณะที่โลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดกระบวนการแข็งตัวจากการเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเทซึ่งทำให้เกิดกระบวนการแข็งตัวจากการสันสะเทือน

5.1.2 ธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมที่ผสมในปริมาณเล็กน้อยทั้งที่ผสมธาตุเดียวและผสมร่วมกันลงในโลหะผสม AA5083 ไม่มีบทบาททำให้ขนาดเกรนลดลง เนื่องจากไม่มีการเกิดขึ้นของเฟสอื่นที่ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมในระหว่างที่โลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดกระบวนการแข็งตัวและในขณะที่ให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งจึงไม่มีเฟสอื่นใดช่วยยับยั้งการเติบโตของเกรน อีกทั้งธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมยังไม่มีบทบาททำให้ความกลมของเกรนเปลี่ยนแปลง เนื่องจากธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมไม่ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการแข็งตัวเปลี่ยนแปลงจึงไม่ทำให้อุณหภูมิช่วงของการแข็งตัวกว้างขึ้นเพื่อไปส่งเสริมให้เกิดกระบวนการแพร่ซึมเมื่ออยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง ดังนั้นขนาดเกรนและความกลมของเกรนในสภาพกึ่งของแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปจากโลหะผสม AA5083 จึงเกิดจากผลของแรงกระทำในขณะที่โลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดกระบวนการแข็งตัวจากการเตรียมโลหะขึ้นต้นด้วยรางเทซึ่งทำให้เกิดกระบวนการแข็งตัวจากการสันสะเทือน

5.1.3 ธาตุเซอร์โคเนียมและธาตุสตรอนเชียมที่ผสมในปริมาณเล็กน้อยทั้งที่ผสมธาตุเดียวและผสมร่วมกันลงในโลหะผสม AA5083 จากการที่ธาตุทั้งสองไม่มีผลทำให้ความกลมและขนาดเกรนเปลี่ยนแปลงจึงไม่มีบทบาททำให้โลหะทุกๆส่วนผสมมีพฤติกรรมการไหลที่ต่างกัน และธาตุทั้งสองยังไม่ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการแข็งตัวเปลี่ยนแปลงไปจากโลหะผสม AA5083 ทำให้ปริมาณสัดส่วนของแข็งเมื่ออยู่ในสภาพกึ่งของแข็งที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่แตกต่างกัน เพื่อไปทำให้โลหะทุกๆส่วนผสมมีพฤติกรรมการไหลที่ต่างกัน ดังนั้นโลหะทุกๆส่วนผสมที่มีพฤติกรรมการไหลต่างกันจึงเกิดจากกลไกอื่น

5.1.4 สภาพที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ Thixoforming จะอยู่ที่สภาวะการให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งอุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส และเวลาดำงโลหะ 30 นาที เมื่อวิเคราะห์จากผลการทดสอบตัดและทดลองขึ้นรูปกับโลหะทุกๆส่วนผสม และที่สภาวะการผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก การผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดจากการทดสอบพฤติกรรมการไหลในสภาพกึ่งของแข็ง ซึ่งเกิดความเครียดขึ้นสูงสุด 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค้างแรงกดคงที่เป็นเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส ดังการทดลองที่เกิดขึ้นกับโลหะผสมหมายเลข 4, 5, 6 และ 7

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาปริมาณการผสมธาตุเซอร์โคเนียม ธาตุสตรอนเชียมและเวลาดำงโลหะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด AA5083 ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับกระบวนการนี้

5.2.2 จากทฤษฎีที่กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างกิ่งก้านไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นดอกกุหลาบและเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมภายใต้แรงกระทำที่มีอัตราเฉือนเพิ่มขึ้นและการไหลลักษณะปั่นป่วนที่รุนแรง จึงควรศึกษาผลของมุมเอียงของรางเทที่มีต่อลักษณะ โครงสร้างจุลภาค เนื่องจากยังไม่มีการศึกษา

5.2.3 ผลของการศึกษาจะอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของเครื่องมือซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองผิดพลาด ซึ่งผู้ที่จะทำการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกันนี้ควรรู้ใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดเพื่อลดความผิดพลาดของการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. Gilbert, K., 2000, **Introduction to Aluminium Alloys and Tempers**, ASM International, Material Park, pp. 105-111.
2. Govender, G. and Ivanchev, L., 2005, **Near Net shape Forming Using Semi-Solid Metal Forming**, National Product Development Center, South Africa, pp. 1-15.
3. Yin, Z., Pan, Q. and Jiang, F., 2000, "Effect of minor Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg based alloys", **Materials Science and Engineering**, A 280, pp. 151-155.
4. Nafisi, S., Lashkari, O., Ghomashchi, R., Ajersch, F. and Charette, A., 2006, "Microstructure and rheological behavior of grain refined and modified semi-solid A356 Al-Si slurries", **Acta Materialia**, Vol. 54, pp. 3503-3511.
5. ชานนท์ บุญนท์, 2548, การปรับสภาพเกรนละเอียดอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A 356 ด้วย สแกนเดียมและเซอร์โคเนียม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 63.
6. Brown, J.R., 1999, **Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook**, 11th ed., Biddles Ltd., Great Britain, p. 41.
7. Haga, T. and Kapranos, P., 2002, "Billetless simple thixoforming process", **Journal of Materials Processing Technology**, No. 130-131, pp. 581-586.
8. Davis, J.R., ed, 1990, **Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, 10th ed., ASM International, Material Park, pp. 196-205.
9. Smith, W.F., 1996, **Principles of Materials Science and Engineering**, 3rd ed., McGraw-Hill Inc., USA, pp. 121-179.

10. Porter, D.A. and Easterling, K.E., 1991, **Phase Transformations in Metals and Alloys**, 7th ed., Great Britain, pp. 186-197.
11. Kearns, M.A., Thistlewaite, S.R., and Cooper, P.S., 1997 “Mechanism of aluminium grain refinement by Ti-B-Al master alloy”, **Materials Science and Engineering**, A 195, pp. 19-28.
12. Stefanescu, D.M., 2002, **Science and Engineering of Casting Solidification**, University of Alabama, USA, pp. 145-218.
13. Zheng, L., Weiming, M. and Zhengduo, Z., 2006, “Research on semi-solid slurry of hypoeutecticAl-Si alloy prepared by low superheat pouring and weak electromagnetic stirring”, **Transaction of Nonferrous Metals Society of China**, [Electronic], pp. 71-76, Available : Science Press / Science Direct [2006, April 2].
14. Vogel, A., Doherty, R.D. and Cantor, B., 1979, **Solidification and Casting of Metals**, The Metal Society, London, pp. 518-525.
15. Fan, Z. 2002, **Semisolid Metal Processing**, The Charlessworth Group, Huddersfield, pp. 11-20.
16. Kiuchi, M., 2001, “Investigated the structural evolution of semi-solid ZE33 magnesium alloy at different solid fractions”, **Journal of Materials Processing Technology**, No. 109, pp. 215-219.
17. Loue, W.R. and Suery, M., 1995, “Influence of thermomechanical on the microstructural evolution of A357 alloy during partial remelting and isothermal holding”, **Materials Science and Engineering**, A 203, pp. 1-13.
18. Blais, S., Loue, W. and Pluchon, C., 1996, “The effects of initial particle morphology on the microstructural during isothermal holding in the semi-solid state of A357 alloy”, **Conference on Semisolid Processing of alloys and composites**, June 1996, Sheffield, pp. 187-192.

19. Liu, D., Atkinson, H.V., Kapranos, P., Jirattiticharoean, W. and Jones, H., 2003, "Micro-structural evolution and tensile mechanical properties of thixoformed high performance aluminium alloys", **Materials Science and Engineering**, A 316, pp. 213-224.
20. Figueredo, A., 2001, **Science and Technology of Semi-Solid metal processing**, The north American Die Casting Association, USA, pp. 1-18.
21. Birol, Y., 2007, "A357 thixoforming feedstock produced by cooling slope casting", **Journal of Materials Processing Technology**, No. 186, pp. 94-101.
22. Yu, K. and Wenxian, L., 2004, "Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Alloys 2618 with Al₃(SC,Zr) Phases", **Materials Science and Engineering**, A 368, pp. 88-93.
23. Rao, A.A. and Murty, B.S., "Role of Zirconium and Impurities in Grain Refinement of Aluminium with Al-Ti-B", **Materials Science and Technology**, Vol. 13, No. 9, pp. 769-777.
24. Lee, S., Utsunomiya, A., Akamatsu, H., Neishi, K., Furukawa, M., Horita, Z. and London, G.T., 2002, "Influence of scandium and zirconium on grain stability and superplastic ductilities in ultrafine-grained Al-Mg alloys", **Acta Materialia**, Vol. 50, pp. 533-564.
25. Furukawa, M., Wang, H. and Hemoto, M.J., 1990, **Aluminium Alloys**, Japan Institute of Light Metals, Japan, p. 95.
26. Horikawa, K., Kurumoto, S. and Kanno, M., 2001, "Intergranular fracture caused by trace impurities in an Al-5.5%Mg alloy", **Acta Materialia**, Vol. 49, pp. 3981-3989.
27. Makhmudov, M., Vakhobov, A.V. and Ganiev, I.N., 2003, "Effects of Additions of Magnesium and Strontium on the Properties of Aluminum", **Materials Characterization**, Vol. 27, No. 10, pp. 587-589.
28. Nafisi, S. and Ghomashchi, R., 2006, "Impact of melt treatment on semi-solid metal processing", **Journal of alloys and compounds**, No. 436, pp. 1-5.

ภาคผนวก ก

ขนาดเกรนมาตรฐาน ASTM E112-96

ตารางที่ ก.1 ขนาดเกรนมาตรฐาน ASTM E112-96

Grain Size No.G	N_A :Grains/Unit Area		A:Average Grain Area		d:Average Diameter		λ :Mean Intercept		N_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm^2	mm	μm	mm	μm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

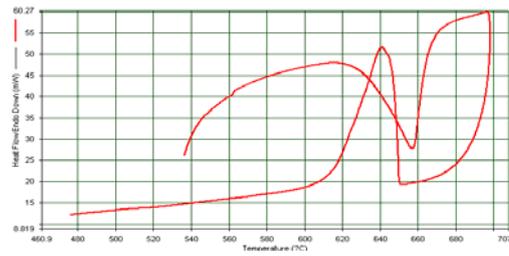
ภาคผนวก ข
ส่วนผสมของโลหะขั้นต้น

ตารางที่ ข.1 ส่วนผสมของโลหะขั้นต้น

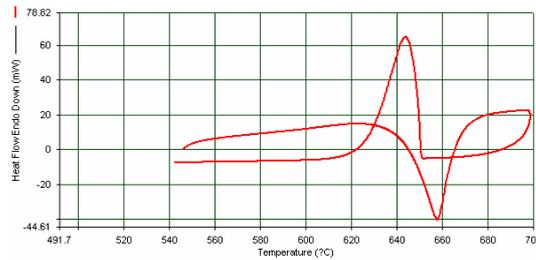
Elements %wt.	โลหะผสมหมายเลข								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	94.35910	94.26930	94.30190	94.34650	94.38090	94.34360	94.2822	94.24920	94.28520
Si	0.06994	0.06668	0.06872	0.07526	0.06868	0.07096	0.07236	0.07140	0.07120
Mg	4.54346	4.56570	4.52435	4.54832	4.53334	4.52563	4.56288	4.54255	4.50078
Zn	0.00550	0.00446	0.00621	0.00574	0.00589	0.00514	0.00413	0.00469	0.00503
Fe	0.20046	0.20100	0.19651	0.20270	0.20151	0.19721	0.20296	0.20067	0.20305
Mn	0.75223	0.76930	0.73801	0.74768	0.73597	0.73112	0.74177	0.76115	0.76196
Ni	0.00460	0.00517	0.00460	0.00434	0.00413	0.00610	0.00640	0.00488	0.00445
Ti	0.00470	0.00471	0.00473	0.00447	0.00462	0.00433	0.00477	0.00462	0.00462
Pb	0.00222	0.00168	0.00220	0.00287	0.00215	0.00134	0.00114	0.00294	0.00252
Sn	0.00223	0.00297	0.00478	0.00271	0.00287	0.00376	0.00322	0.00334	0.00297
Cr	0.00338	0.00338	0.00342	0.00339	0.00329	0.00347	0.00353	0.00364	0.00349
B	0.00098	0.00096	0.00093	0.00087	0.00093	0.00083	0.00088	0.00093	0.00091
Ca	0.00061	0.00066	0.00059	0.00043	0.00057	0.00062	0.00059	0.00052	0.00030
Na	0.00027	0.00035	0.00037	0.00020	0.00041	0.00030	0.00038	0.00040	0.00042
P	0.00092	0.00091	0.00093	0.00078	0.00083	0.00082	0.00081	0.00052	0.00090
Sb	0.00026	0.00035	0.00075	0.00077	0.00052	0.00043	0.00049	0.00028	0.00011
Zr	0.00093	0.04182	0.08128	0.00072	0.00079	0.04693	0.04832	0.08276	0.08651
Ag	0.00005	0.00007	0.00002	0.00009	0.00016	0.00013	0.00025	0.00019	0.00022
Bi	0.00009	0.00015	0.00008	0.00013	0.00010	0.00019	0.00028	0.00009	0.00019
Be	0.00003	0.00007	0.00014	0.00005	0.00004	0.00006	0.00016	0.00004	0.00009
Cu	-	-	-	0.00420	0.00034	0.00001	0.00291	0.00110	0.00290
Sr	-	-	-	0.02073	0.04184	0.02798	0.04448	0.02423	0.04527

ภาคผนวก ค

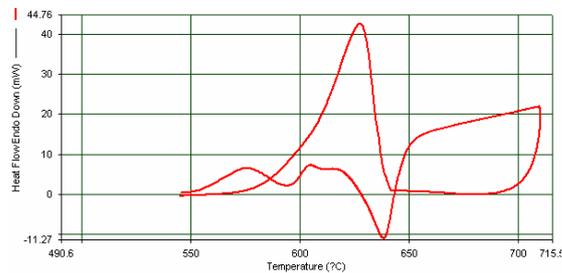
ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis:DTA



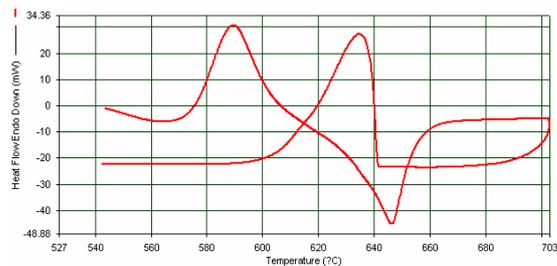
รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083



รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง DTA ของโลหะผสม AA5083 เมื่อผสมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักร่วมกับธาตุสตรอนเชียมร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายทศพร เงินเนตร
วัน-เดือน-ปีเกิด	9 กุมภาพันธ์ 2513
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างโลหะ
ระดับอาชีวศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก พ.ศ. 2534
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พ.ศ. 2536
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

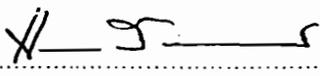
วันที่ 18 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2550

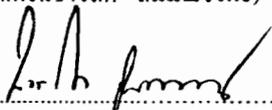
ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... ทศพร..... เงินเนตร..... รหัสประจำตัว..... 46430707.....
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา โท เอก
หลักสูตร..... วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต..... สาขาวิชา..... วิศวกรรมโลหการ..... คณะ..... วิศวกรรมศาสตร์.....
อยู่บ้านเลขที่..... 41/74..... หมู่ที่..... 7..... ซอย..... ถนน..... ตำบล/แขวง..... ไม้จาม..... อำเภอ..... เมือง.....
จังหวัด..... ตาก..... รหัสไปรษณีย์..... 63000..... ขอ โอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี..... รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์..... ตำแหน่ง..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์..... เป็นผู้รับโอน
ลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง..... ผลของธาตุผสมปริมาณเล็กน้อยที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรม
การไหลในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 สำหรับกระบวนการ Thixoforming.....
ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ..... รศ.ดร.ชาวลิต... ลีम्मณีวิจิตร... ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์
พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าเป็น
วิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือ เผยแพร่ต่อ
สาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่ง พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์
พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำมิได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ..... ..... ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายทศพร เงินเนตร)

ลงชื่อ..... ..... ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ..... ..... พยาน
(รศ.ดร.ชาวลิต ลีम्मณีวิจิตร)

ลงชื่อ..... ..... พยาน
(รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์)