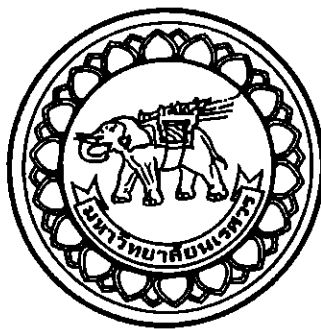




การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค

และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND
MECHANICAL PROPERTIES OF CAST ALUMINUM ALLOYS A390

นางสาวอภิญญา เวชการ รหัส 50362962
นายอภิชาติ ชื่อนาม รหัส 50365628

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ... 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน... 1596 5400
เลขเรียกหนังสือ... นร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๒253

D 2553

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2553



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และ
สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวอภิญญา เวชการ รหัส 50362962
 นายอภิชาติ ชื่อนาม รหัส 50365628

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์

ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์อัมพร เวียงมูล

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์สุสิทธิ์ ป่าไร่)

.....กรรมการ
(อาจารย์ธนิศานต์ ธงชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวอภิญญา เวชการ	รหัส	50362962
	นายอภิชาติ ชื่อนาม	รหัส	50365628
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์		
ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์อัมพร เวียงมูล		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2553		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ประกอบด้วยขั้นตอนการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง จากนั้นชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานผ่านขั้นตอนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วย เฟสซิลิคอนปฐมภูมิ เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม เฟสคอปเปอร์-อะลูมิเนียม (CuAl_2) และเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม โดยในสภาพหล่อนี้มีค่าความแข็งเท่ากับ 131.760 HB และค่าความแข็งแรงเท่ากับ 95.817 MPa หลังจากการอบละลายพบว่า เฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่จากเดิมเป็นแท่งยาว ปลายแหลม เปลี่ยนลักษณะเป็นกลมมนมากขึ้น ในการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเท่ากับ 147.854 HB และค่าความแข็งแรงเท่ากับ 142.980 MPa ขั้นตอนการบ่มแข็ง โครงสร้างทางจุลภาคจะมีลักษณะเหมือนในขั้นตอนการอบละลาย แต่มีการตกตะกอนของอนุภาคนาโนขนาดเล็กของเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียมในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม ในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 171.45 HB และค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 168.588 MPa

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และอาจารย์อัมพร เวียงมูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ตลอดจนแนะนำวิธีการในการแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมาจนสามารถทำงานลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และอาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราย ครูช่างธวัชชัย ชูลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง นักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตถุภาพ และคุณปัทมา อภิชัย ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ให้ถูกต้องอีกด้วย

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้ทำโครงการ จนงานลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องตัดชิ้นงาน เครื่องขัดโลหะ เตาอบอุณหภูมิสูง และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถเรียน และทำโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำโครงการนี้จนลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ผู้ดำเนินโครงการ

อภิญา เวชการ

อภิชาติ ชื่อนาม

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	5
2.1 การหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting)	5
2.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ.....	6
2.3 การเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อผสมโดยกรรมวิธีทางความร้อน.....	19
2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy).....	25
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy).....	26
2.6 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer).....	28
2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	30
2.8 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	32
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	34
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ.....	34
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์.....	35
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....	41
4.1 ผลการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ในสภาพหล่อ.....	41
4.2 ผลการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390 หลังผ่านการอบละลาย.....	50
4.3 ผลการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390 หลังผ่านการบ่มแข็ง.....	56
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 บทสรุป.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	65
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	70
ภาคผนวก ค.....	75
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน.....	3
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390.....	35
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิของชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	43
4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมในสภาพหล่อ.....	45
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	46
4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของอะลูมิเนียม ทองแดง และซิลิคอน ของชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	48
ก.1 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ.....	69
ข.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบริเวณเฟสต่างๆ ของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน.....	71
ข.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานทดสอบแรงดึงในสภาพหล่อ.....	72
ข.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังผ่านการอบละลาย.....	72
ข.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังผ่านการบ่มแข็ง.....	73
ข.5 ปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน...	74
ค.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน.....	76
ค.2 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน.....	76

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบหล่อแม่พิมพ์ถาวร.....	5
2.2 แบบจำลองการเติบโตของผลึก (Dendritic Growth) และโครงสร้างของเกรนในอะลูมิเนียมผสมหล่อ.....	7
2.3 แผนภาพวิภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....	9
2.4 แผนภาพวิภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงบริเวณที่มีองค์ประกอบเป็นไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติก.....	10
2.5 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบไฮโปยูเทคติก.....	11
2.6 โครงสร้างยูเทคติกของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน.....	12
2.7 โครงสร้างไฮเปอร์ยูเทคติกของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (x 100 เท่า).....	13
2.8 แผนภาพวิภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม.....	15
2.9 แผนภาพวิภาคแสดงพื้นผิวลิวต์สของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน.....	16
2.10 แผนภาพวิภาคแสดงพื้นผิวลิวต์สของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน.....	17
2.11 แผนภาพวิภาคแสดงพื้นผิวลิวต์สของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน.....	17
2.12 แผนภาพวิภาคแสดงพื้นผิวโซลวัส ซึ่งแสดงความสามารถในการละลายของธาตุในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน.....	18
2.13 แผนภาพวิภาคแสดงช่วงอุณหภูมิกรรมวิธีทางความร้อน.....	20
2.14 แผนภาพแสดงลักษณะเส้นของเฟสที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีทางความร้อน.....	20
2.15 โครงสร้างพื้น และลักษณะการเกิดตะกอน.....	23
2.16 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของโลหะผสมที่สามารถทำการเพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไกการตกตะกอน และถูกทำให้อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดโดยการบ่มแข็ง...	24
2.17 เส้นโค้งในการบ่มแข็ง (ความแข็งแรง และความแข็งแรงกับเวลา) ที่อุณหภูมิหนึ่งของโลหะผสมที่สามารถทำการเพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไกการตกตะกอนได้.....	25
2.18 Bragg 's Law.....	29
2.19 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์.....	29
2.20 หลักการทดสอบความแข็งแรงแบบบรินลล์.....	31
2.21 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM B557.....	32
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	34
3.2 ชิ้นงานที่นำไปทดสอบแรงดึง.....	36
3.3 การอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง.....	37
3.5 การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	38
3.6 การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	38
4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหลอมจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	41
4.2 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิในสภาพหล่อ..	42
4.3 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมในสภาพหล่อ.....	44
4.4 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในสภาพหล่อ.....	45
4.5 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียมทองแดง และซิลิคอน ชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	47
4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	48
4.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	49
4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ.....	49
4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ และหลังผ่านการอบละลาย ชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	51
4.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลาย.....	53
4.11 ค่าความแข็งของชิ้นงานสภาพหล่อ และหลังผ่านการอบละลาย.....	55
4.12 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	56
4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็ง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	57
4.14 ปริมาณของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน.....	58
4.15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็ง.....	59
4.16 ผลของค่าความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน.....	60
4.17 ผลของค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน.....	61
4.18 ภาพถ่าย BEI ของโครงสร้างทางจุลภาค และผล EDXS ของชิ้นงานในสภาพหล่อ ที่ผ่านการทดสอบแรงดึงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	62
4.19 ภาพถ่าย BEI ของโครงสร้างทางจุลภาค และผล EDXS ของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ที่ผ่านการทดสอบแรงดึงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	63

สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

- As-Cast = ชิ้นงานในสภาพหล่อ
- ST 480-4 = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- ST 480-8 = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- ST 500-4 = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- ST 500-8 = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- Ag 160-8 = ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- Ag 180-8 = ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อย ความแข็งแรงสูง และต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ผู้ประกอบการรถยนต์จึงให้ความสนใจแผนการพัฒนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากอะลูมิเนียมหล่อแทนชิ้นส่วนจากเหล็ก (เขาวลิต และวิทยา, 2545)

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ได้ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) เป็นอะลูมิเนียมผสมหล่อที่นิยมใช้ในงานหล่อผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยทั่วไป การหล่ออะลูมิเนียมผสมหล่อนั้นมักจะพบปัญหามากมายในแง่ของคุณภาพของชิ้นงานหล่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ ซึ่งสมบัติทางกลนั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมหล่อส่วนใหญ่ เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนมีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน ดังนั้นเราจึงต้องทำการปรับปรุงรูปร่างของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนให้มีความกลมมนขึ้น จึงจะทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานนั้นดีขึ้น ก็คือต้องนำชิ้นงานมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (Precipitation Hardening) (Kori et al., 2000)

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก จากการศึกษาโครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การผลิต และการนำเอาอะลูมิเนียมผสมไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร

1.2.2 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวรก่อนผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (As-Cast)

1.3.2 โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวรหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวรก่อนผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (As-Cast)

1.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวรหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วัสดุที่ใช้คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร และเทที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

1.5.2 ศึกษากรรมวิธีทางความร้อนที่ประกอบด้วย การอบละลายที่อุณหภูมิ 480 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง จากนั้นชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

1.5.3 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน

1.5.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพร้อมทั้งวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่อยู่ในเฟสต่างๆ

1.5.5 ศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

1.5.6 ศึกษาสมบัติทางกลดังต่อไปนี้

- ศึกษาสมบัติทางความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์
- ศึกษาสมบัติทางความแข็งแรง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ และวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

มิถุนายน 2553 – เมษายน 2554

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ

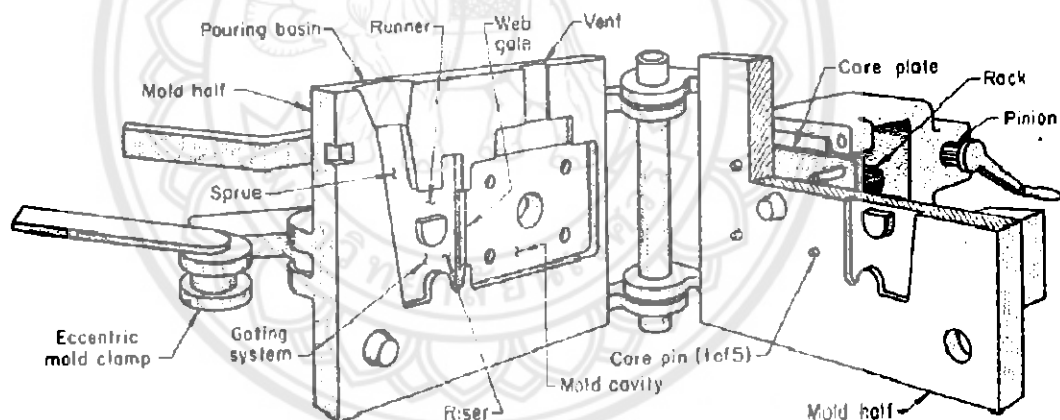
ลำดับ	การดำเนินงาน	ปี พ.ศ. 2553							ปี พ.ศ. 2554			
		มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ทำการเสนอหัวข้อโครงการ	↔										
2	ศึกษาหาข้อมูลทั่วไปของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด A390		↔									
3	ศึกษากรรมวิธีทางความร้อนที่มีผลต่ออะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390			↔								
4	จัดหาวัตถุดิบ และจัดเตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง					↔						

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 การหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting)

การหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร เป็นการหล่อโดยให้น้ำโลหะลงในแม่พิมพ์โดยใช้ประโยชน์จากแรงโน้มถ่วงของโลก โดยให้น้ำโลหะไหลผ่านไปตามช่องว่าง (Cavity) ในแม่พิมพ์ ตามลักษณะรูปแบบที่ต้องการ แบบแม่พิมพ์โดยมากทำจากเหล็กหล่อสีเทา เหล็กกล้า บรอนซ์ แกรไฟต์ หรือวัสดุชนิดอื่น ขึ้นส่วนที่ผลิตมาจากแบบหล่อถาวรประกอบด้วย ลูกสูบเครื่องยนต์ หัวกระบอกสูบ ตลอดจนชิ้นส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ลักษณะของแบบหล่อถาวรอาจเป็นง่าย ๆ ที่มีระบบการทำงานด้วยมือ ดังแสดงดังรูปที่ 2.1 ก) เป็นแบบที่มีการทำงานที่ซับซ้อน โดยสามารถปิด-เปิดแบบได้บนฐานรองที่ออกแบบกลไกให้เลื่อนเข้า-ออกได้สะดวก แสดงดังรูปที่ 2.1 ข) การหล่อลักษณะนี้ช่วยประหยัดต้นทุนในการผลิต เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป (ณรงค์ศักดิ์, 2553)

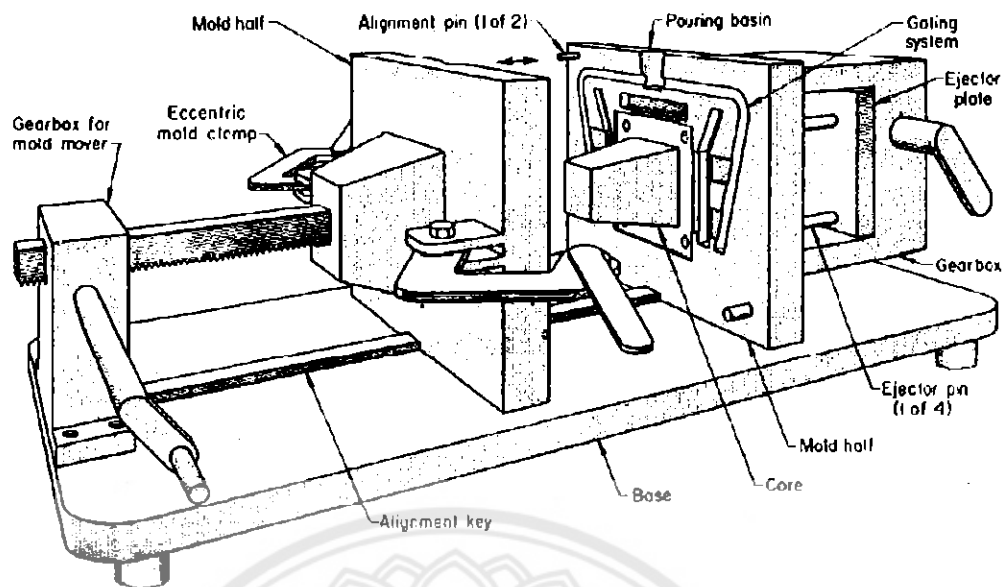


ก)

รูปที่ 2.1 แบบหล่อแม่พิมพ์ถาวร

ก) แบบปิด-เปิดอย่างง่าย

ที่มา : ณรงค์ศักดิ์ (2553)



ข)

รูปที่ 2.1 (ต่อ) แบบหล่อแม่พิมพ์ถาวร

ข) แบบเลื่อนปิด-เปิดบนฐานรอง

ที่มา : ณรงค์ศักดิ์ (2553)

2.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ

อะลูมิเนียมผสมเป็นโลหะที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมผสมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อย และความแข็งแรงสูง สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ ทนทานต่อการเกิดสนิม และการกัดกร่อนในบรรยากาศได้ดี แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรด และด่าง หาซื้อได้ง่าย และราคาไม่แพงมากนัก (พยุร, 2523)

2.2.1 การจำแนกประเภทของอะลูมิเนียมผสม

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถจำแนกอะลูมิเนียมผสมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.2.1.1 อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloy) เป็นโลหะผสมที่ต้องผ่านการแปรรูปแบบพลาสติก เช่น การรีดขึ้นรูปเป็นแผ่น หรือเป็นแท่ง

2.2.1.2 อะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อ (Cast Aluminum Alloy) มีสมบัติการไหลที่ดี ธาตุผสมที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนเพิ่มความสามารถในการไหล และต้านทานการแตกกร้าวของงานหล่อได้ดี

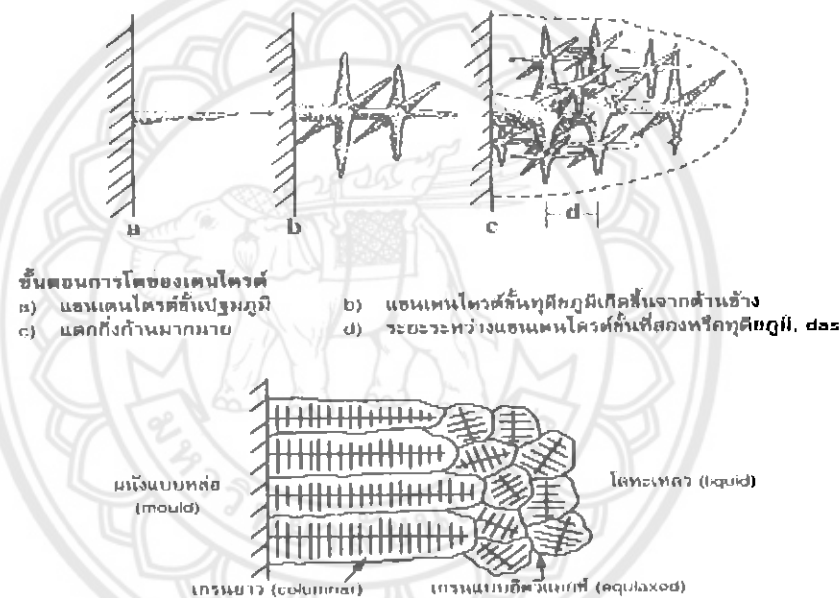
2.2.2 การควบคุมโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม

ปัจจัยที่ควบคุมสมบัติของอะลูมิเนียมผสมมี 2 ประการ คือ

2.2.2.1 ขนาด และรูปร่างของเกรน (Grain Size and Shape)

2.2.2.2 ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (Secondary Dendrite Arm Spacing)

ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิเป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของสารประกอบ (Intermetallic Compound) ที่อยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ และการกระจายตัวของโพรงหดตัวระหว่างเดนไดรต์ ซึ่งการเติบโตของผลึก และโครงสร้างของเกรนในอะลูมิเนียมผสมหล่อ (ธนาภรณ์ และคณะ, 2543) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการเติบโตของผลึก (Dendritic Growth) และโครงสร้างของเกรน อะลูมิเนียมผสมหล่อ

ที่มา : ธนาภรณ์ และคณะ (2543)

2.2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม

โลหะอะลูมิเนียมผสมเป็นที่รู้จัก และนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยเฉพาะในงานหล่อขึ้นรูป เนื่องจากมีคุณสมบัติหลอมเหลวต่ำ ไม่ละลายก๊าซต่างๆ ยกเว้นไฮโดรเจน มีการไหลตัวดีมาก ส่งผลให้ผิวของงานหล่อมีความเรียบสวย แต่ก็มีปัญหาเรื่องการหดตัวของเดนไดรต์ประมาณร้อยละ 3.5–8.5 ในระหว่างการแข็งตัว ทำให้รูพรุนเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ในอะลูมิเนียมผสมมีการเติมธาตุหลายตัวลงในอะลูมิเนียม เพื่อปรับสมบัติทางกลให้ดีขึ้น (Polmear, 1989) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของการละลายของธาตุนั้นๆ ในโลหะอะลูมิเนียมด้วย สมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกาได้

แบ่งโลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมตามธาตุผสมที่เติมเข้าไปในโลหะอะลูมิเนียม และตั้งรหัสสำหรับธาตุผสมกลุ่มนั้นๆ โดยให้ตัวเลขตัวแรกของรหัสแสดงถึงธาตุหลักที่เติมเข้าไปในโลหะอะลูมิเนียมผสมดังนี้

1xx.x เป็นโลหะหล่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการเติมธาตุผสมใดเข้าไปเลย มีอะลูมิเนียมเท่ากับร้อยละ 99.0 โดยน้ำหนัก หรือมากกว่า

2xx.x มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก

3xx.x มีซิลิคอน และแมกนีเซียม หรือทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก

4xx.x มีซิลิคอนเป็นธาตุผสมหลัก

5xx.x มีแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลัก

6xx.x มีแมกนีเซียม และซิลิคอนเป็นธาตุผสมหลัก

7xx.x มีสังกะสีเป็นธาตุผสมหลัก

8xx.x มีดีบุกเป็นธาตุผสมหลัก

9xx.x มีธาตุอื่นๆ เป็นธาตุผสมหลัก

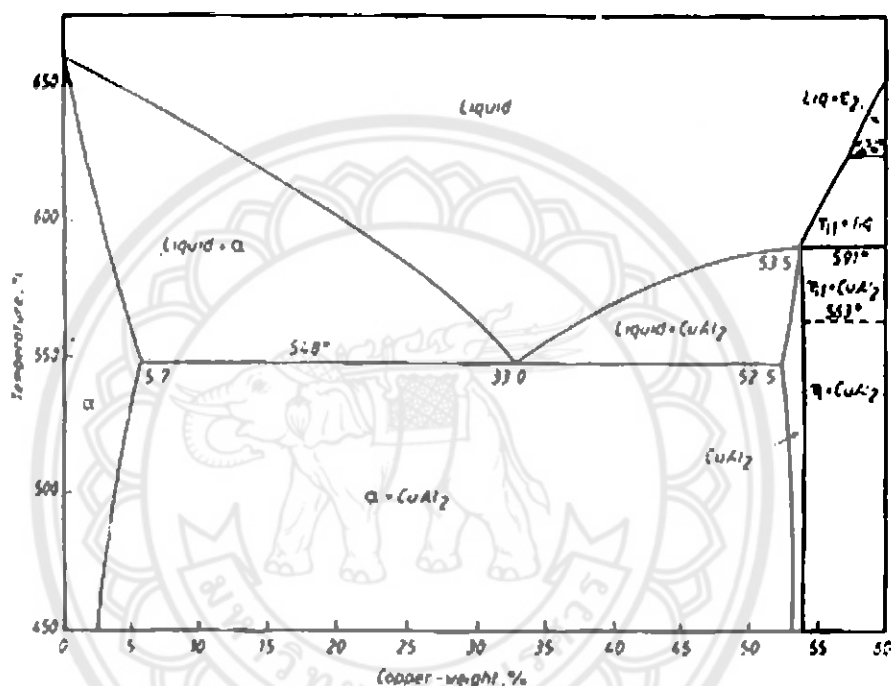
ในกลุ่ม 1xx.x ตัวเลขลำดับที่ 2 จากทางซ้ายมือแสดงปริมาณอะลูมิเนียมอย่างต่ำในโลหะอะลูมิเนียมหล่อผสม เช่น โลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมรหัส 190.x จะมีอะลูมิเนียมร้อยละ 99.90 โดยน้ำหนัก ในกลุ่ม 2xx.x ถึง 9xx.x ตัวเลขลำดับที่จากซ้ายไม่มีความสำคัญแต่อย่างใด แต่ช่วยในการบ่งชี้ธาตุผสมที่แตกต่างกันในกลุ่ม ส่วนตัวเลขหลังจุดทศนิยมบอกลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น 1 จะหมายถึงผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอินกอต (Ingot) (ธนาคาร, 2547)

2.2.4 ชนิดของอะลูมิเนียมผสม มี 4 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

2.2.4.1 โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงสามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม (มโนส, 2541) จากแผนภาพวัฏภาคของอะลูมิเนียม-ทองแดง แสดงดังรูปที่ 2.3 ทองแดงสามารถละลายในอะลูมิเนียมได้ถึงร้อยละ 5.7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง โดยละลายได้เพียงร้อยละ 0.1-0.2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงเป็นกลุ่มที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอดีต แต่ปัจจุบันมีปริมาณการใช้ลดลง เนื่องจากนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมาแทน ซึ่งมีสมบัติทางด้านงานหล่อดีกว่าโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ส่วนใหญ่มีปัญหาเรื่องการแตกขณะร้อน (Hot-Tear) และมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่มาก เนื่องจากการหดตัวของโครงสร้างทางจุลภาค นอกจากนี้ความสามารถในการไหลตัวของน้ำโลหะค่อนข้างต่ำ การขึ้นรูปจึงต้องอาศัยแรงดันช่วยการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ หรือออกแบบช่องทางเดินน้ำโลหะให้กว้าง และเผื่อรูล้นให้ดี และมีประสิทธิภาพด้วย อย่างไรก็ตามโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง สามารถตอบสนองต่อการปรับ

สภาพได้ดี เช่น โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง รหัส 201 มีองค์ประกอบ $\text{Al-4.7Cu-0.7Ag-0.3Mg}$ โดยเมื่อผ่านการบ่มแข็งแล้วเกิดตกตะกอนเป็นเฟส θ (CuAl_2) ซึ่งเป็นแผ่นบางๆ มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทโรมบิก วางตัวในแนวระนาบ $\{1\ 1\ 1\}$ ของโครงสร้างพื้น ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงถึง 550 เมกกะปาสคาล (Polmear, 1989) ซึ่งสูงกว่าค่าความต้านแรงดึงของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โลหะกลุ่มนี้นำไปใช้ผลิตเครื่องจักร และอุปกรณ์ประกอบไฮดรอลิก (ธนากรณ, 2547)

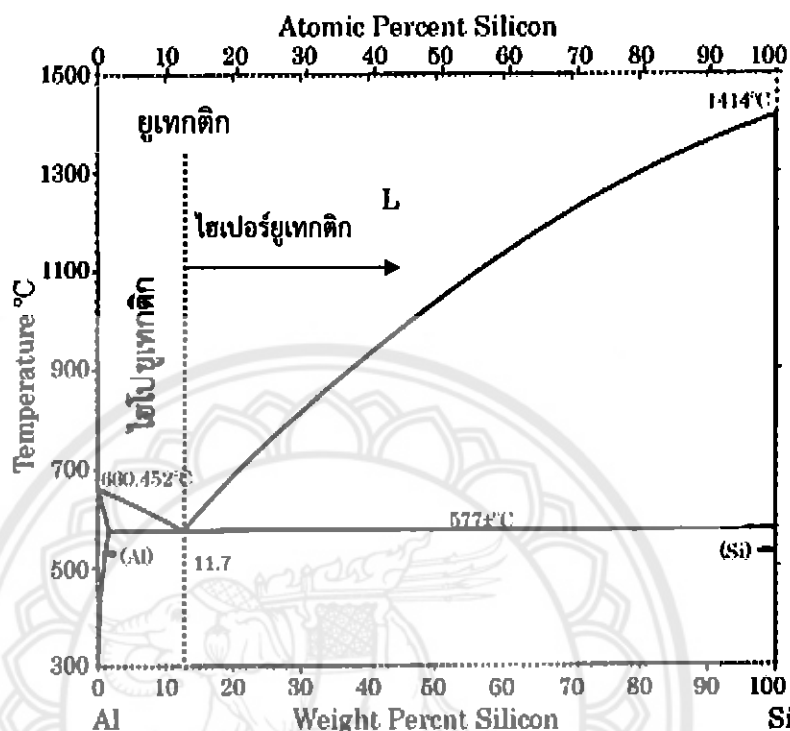


รูปที่ 2.3 แผนภาพวิภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง
ที่มา : King (1987)

2.2.4.2 โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

เนื่องจากซิลิคอนมีระบบผลึก และจุดหลอมเหลว ที่แตกต่างจากอะลูมิเนียมจึงทำให้ค่อนข้างมีข้อจำกัดในการรวมตัวอยู่มาก (มนัส, 2541) แสดงดังรูปที่ 2.4 เกิดปฏิกิริยายูเทกติกที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส ณ ส่วนผสมซิลิคอนร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิเดียวกันซิลิคอนสามารถละลายในอะลูมิเนียมได้เพียงร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก และลดเหลือเพียงร้อยละ 0.05-0.008 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส (King, 1987) โลหะอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ใช้ในการหล่อขึ้นรูปมากถึงร้อยละ 85-90 ของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียมทั้งหมด (อุมารินทร์, 2548) เนื่องจากมีความสามารถในการไหลตัวสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อส่วนผสมเข้าใกล้ยูเทกติก นอกจากนี้ข้อได้เปรียบของโลหะหล่อผสมกลุ่มนี้คือ ด้านทานการกัดกร่อนได้สูง ความสามารถทางการเชื่อมดี และซิลิคอนมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ (Polmear, 1989) โครงสร้างของโลหะหล่อผสม

อะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ช่วงตามองค์ประกอบของซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.4 ได้แก่ ไฮโปยูเทกติก ยูเทกติก และไฮเปอร์ยูเทกติก

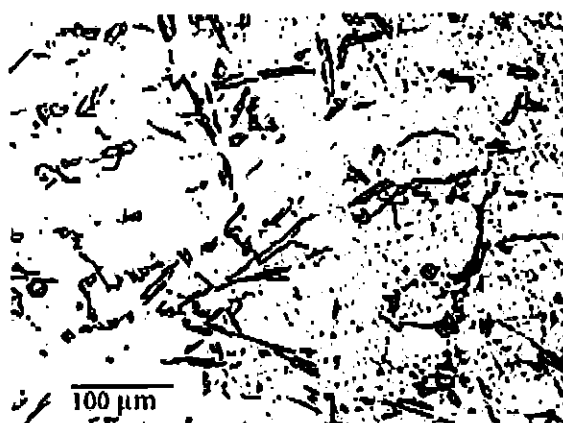


รูปที่ 2.4 แผนภาพวัฏภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงบริเวณที่มีองค์ประกอบเป็นไฮโปยูเทกติก ยูเทกติก และไฮเปอร์ยูเทกติก

ที่มา : Abd El-Salam et al. (2010)

ก. โครงสร้างในอะลูมิเนียมหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบไฮโปยูเทกติก

โลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทกติกของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีส่วนผสมของซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 11.7 ซึ่งจะประกอบด้วยเฟสปฐมภูมิของอะลูมิเนียมที่หยาบ มีลักษณะการโตของเดนไดรต์ในทุกทิศทุกทาง และมีโครงสร้างของยูเทกติกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างเดนไดรต์ ดังรูปที่ 2.5 ก) เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีช่วงการแข็งตัวกว้าง จึงสามารถพบโพรงที่เกิดจากการหดตัวของเดนไดรต์กระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน แสดงดังรูป 2.5 ข) โครงสร้างที่หยาบทำให้สมบัติทางกลไม่ดีนัก โลหะไฮโปยูเทกติก (Hypoeutectic) 2 ชนิดของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากมีข้อจำกัดของสมบัติทางกลอยู่มาก มักมีการผสมทองแดง หรือแมกนีเซียมเข้าไปด้วย เพื่อให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการตกตะกอนได้



ก)



ข)

รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบไฮโปยูเทกติก

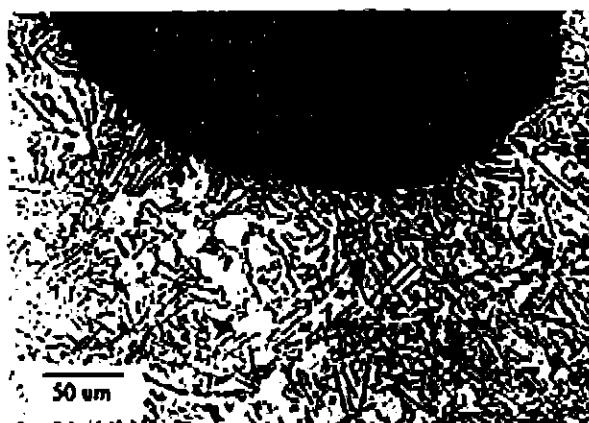
ก) ซิลิคอนผสมร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก (Pearce, 2548)

ข) ซิลิคอนผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (Ran et al., 2006)

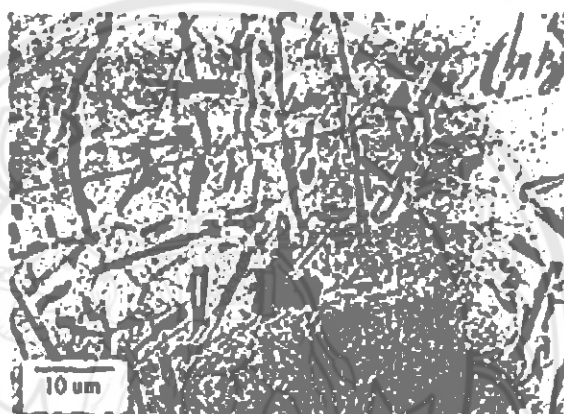
ที่มา : Pearce (2548) และ Ran et al. (2006)

ข. โครงสร้างในอะลูมิเนียมหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบยูเทกติก

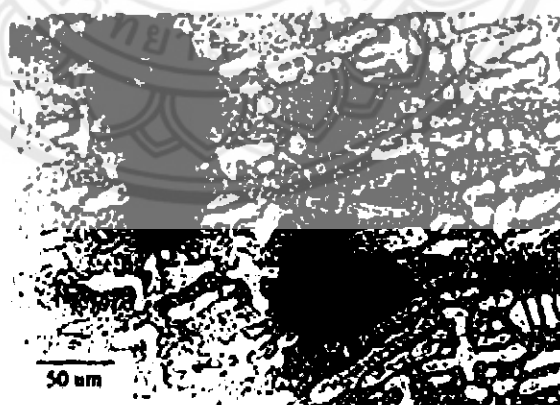
โลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบยูเทกติกของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีส่วนผสมของซิลิคอนประมาณร้อยละ 11.7 ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการตกตะกอนได้ จึงต้องมีการเติมโลหะเจืออื่นๆ การเติมธาตุแมกนีเซียม หรือทองแดง เพื่อที่จะสามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ และทนต่อการกัดกร่อน โลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบยูเทกติกมีลักษณะของยูเทกติกซิลิคอนที่ค่อนข้างหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.6 ก) และ ข) แต่ก็สามารถปรับขนาดให้ละเอียดขึ้นได้ โดยการเติมธาตุโซเดียม หรือสตรอนเชียมในน้ำโลหะเพียงร้อยละ 0.01-0.015 โดยน้ำหนัก จะทำให้ยูเทกติกเคลื่อนจากร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนักไปเป็นซิลิคอนร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิคอน-ปฏิกิริยา และทำให้ยูเทกติกซิลิคอนละเอียดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.6 ค) และ ง)



ก)



ข)



ค)

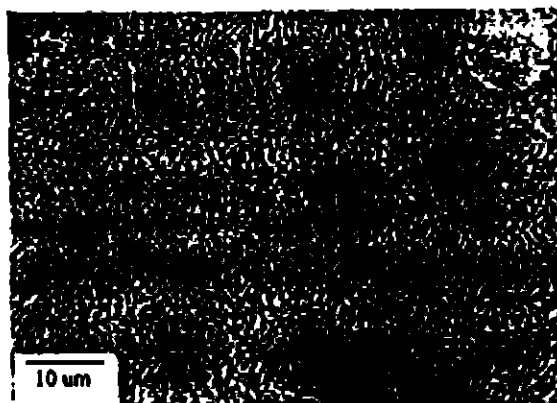
รูปที่ 2.6 โครงสร้างยูเทกติกของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

ก) ไม่ได้รับการปรับขนาดยูเทกติกซิลิคอน

ข) ภาพถ่ายผลึกยูเทกติกซิลิคอนขนาดใหญ่

ค) โครงสร้างที่ปรับปรุงขนาดของยูเทกติกซิลิคอนให้ละเอียดขึ้น

ที่มา : Cornell and Bhadeshia (1999)



ง)

รูปที่ 2.6 (ต่อ) โครงสร้างยูเทคติกของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

ง) ภาพถ่ายขยายผลึกยูเทคติกซิลิคอนหลังการปรับปรุง

ที่มา : Cornell and Bhadeshia (1999)

ค. โครงสร้างในอะลูมิเนียมหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบไฮเปอร์ยูเทคติก

โลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบไฮเปอร์ยูเทคติกของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.7 มีสมบัติทนต่อการเสียดสีได้ดี และมีการขยายตัวเพราะความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงมักนำไปใช้งานประเภทลูกสูบที่มีการสั่นดาภายใน และเสื้อสูบเครื่องยนต์รถที่ผลิตด้วยการหล่อในแม่พิมพ์ถาวร ซึ่งใช้ได้โดยไม่ต้องมีปลอกสูบเหล็ก โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมที่มีองค์ประกอบไฮเปอร์ยูเทคติกมีลักษณะของซิลิคอนปฐมภูมิที่หยาบจึงมีการเติมฟอสฟอรัส เพื่อลดขนาดของซิลิคอนปฐมภูมิให้ละเอียดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.7

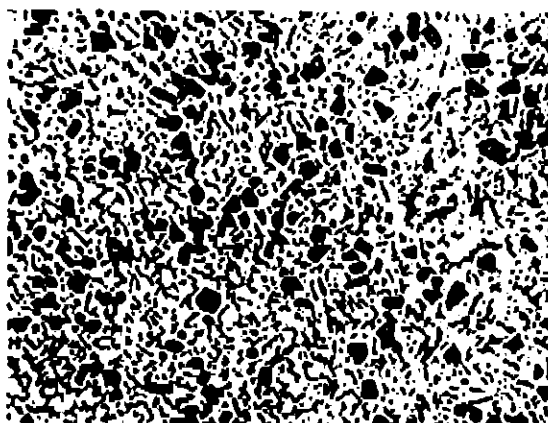


ก)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างไฮเปอร์ยูเทคติกของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (x 100 เท่า)

ก) ไม่ได้รับการปรับขนาดซิลิคอนปฐมภูมิ

ที่มา : Polmear (1989)



ข)

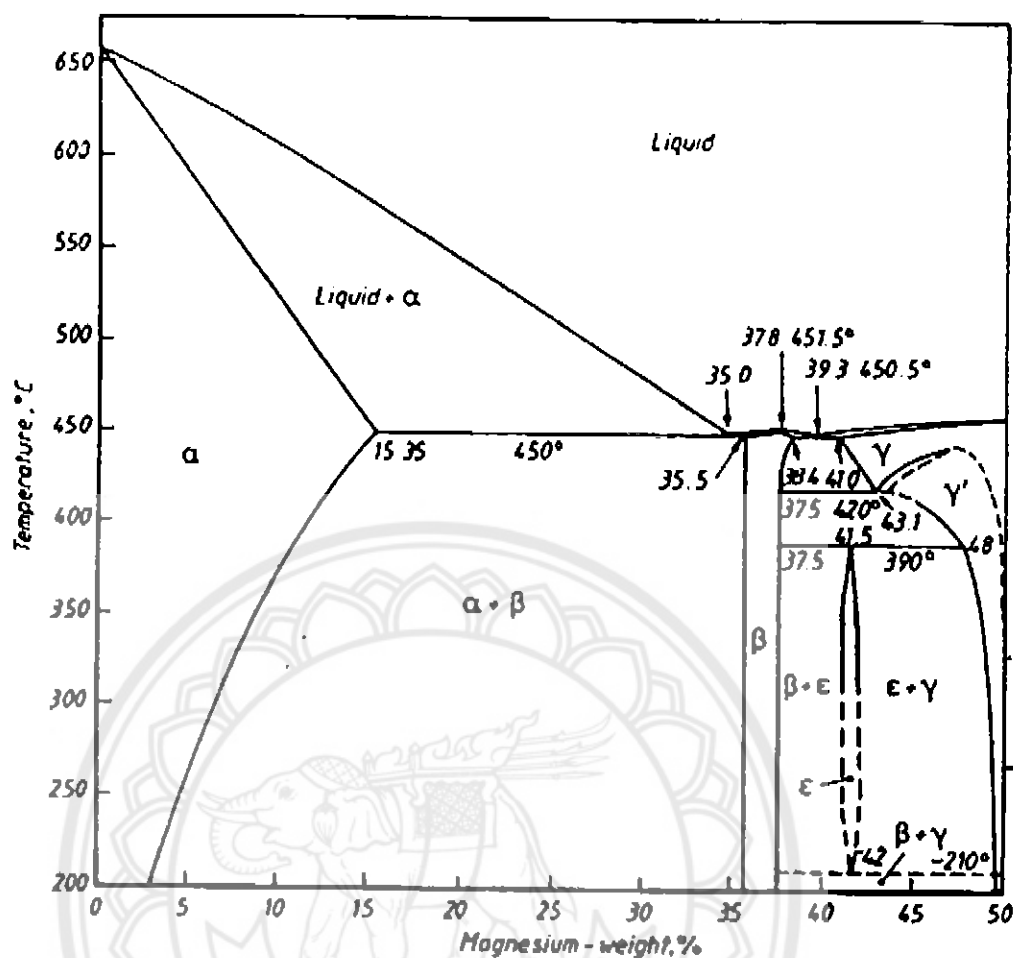
รูปที่ 2.7 (ต่อ) โครงสร้างไฮเปอร์ยูเทกติกของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (x 100 เท่า)

ข) โครงสร้างที่เติมฟอสฟอรัสเพื่อปรับขนาดของซิลิคอนปฐมให้ละเอียดขึ้น

ที่มา : Polmear (1989)

2.2.4.3 โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม

แมกนีเซียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา และมีจุดหลอมเหลวต่ำอยู่ในช่วงเดียวกับอะลูมิเนียมมีค่า 651 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากมีระบบผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม จึงทำให้การละลายในอะลูมิเนียมได้เพียงร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และได้สูงสุดร้อยละ 15.35 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิยูเทกติก ส่วนประกอบยูเทกติกมีแมกนีเซียมเท่ากับแมกนีเซียมร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก โครงสร้างประกอบด้วยเฟส α -Al และ β -Mg₂Al₃ แสดงดังรูปที่ 2.8 (King, 1987) จากแผนภาพวัฏภาคสังเกตได้ว่า ค่าการละลายของแมกนีเซียมลดลงมาก เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะตอบสนองต่อการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดการตกตะกอนเพิ่มความแข็งแรงได้ดี แต่โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม มีสมบัติทางด้านการหล่อไม่ดี เมื่อเทียบกับโลหะอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (มนัส, 2541) จึงมีการใช้งานโลหะผสมแบบสามองค์ประกอบ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป



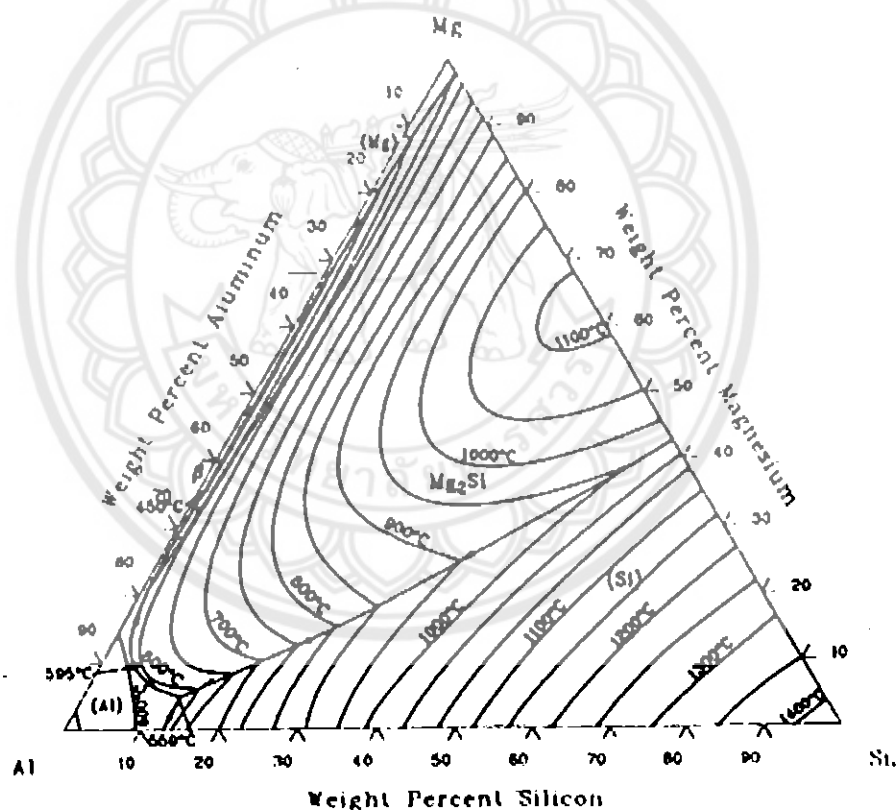
รูปที่ 2.8 แผนภาพวัฏภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม

ที่มา : King (1987)

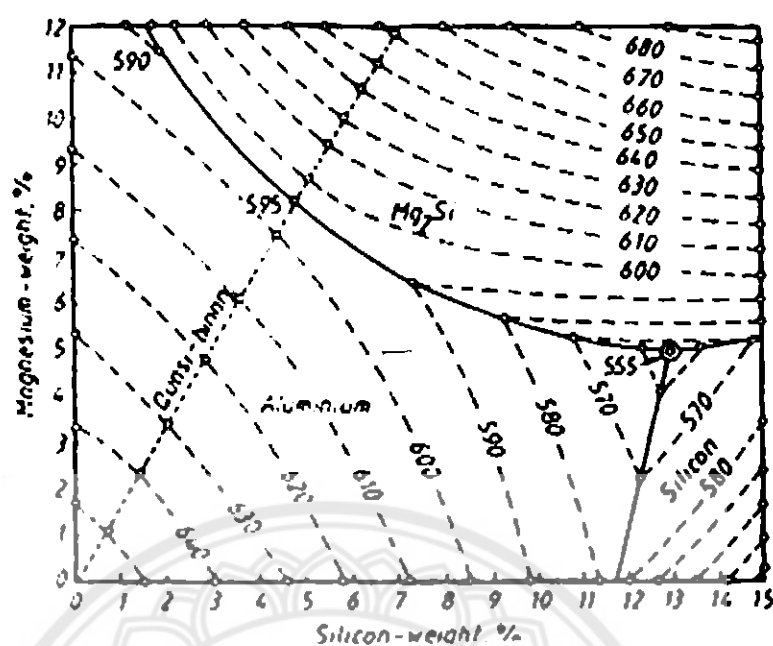
2.2.4.4 โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน

โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน เป็นโลหะผสมที่มีสมบัติด้านการหล่อดี และสามารถตอบสนองต่อการอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ดีอีกด้วย ซึ่งเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม และโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เข้าด้วยกัน เมื่อพิจารณาระหว่างแมกนีเซียมกับซิลิคอนแล้ว ปรากฏว่าจะรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบระหว่างโลหะคือ แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) ที่มีซิลิคอนร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก และช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งด้านงานหล่อ และอบชุบแข็งด้วยความร้อนอีกด้วย (มนัส, 2541) จากแผนภาพวัฏภาคแบบองค์ประกอบสาม แสดงพื้นผิวลิกวิดัส (Liquidus Surface) ดังรูปที่ 2.9 จะสังเกตเห็นว่า โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน สารประกอบทั้งสามธาตุจะไม่รวมกัน จะมีเพียงสารประกอบระหว่างโลหะของแมกนีเซียมซิลิไซด์เท่านั้น จากภาพขยายพื้นผิวลิกวิดัสบริเวณที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมสูงดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าจุดยูเทกติกอยู่ที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส บนเส้นสององค์ประกอบเทียม (Quasi-Binary) ประกอบด้วยแมกนีเซียมร้อยละ 8.15 โดยน้ำหนัก และซิลิคอน

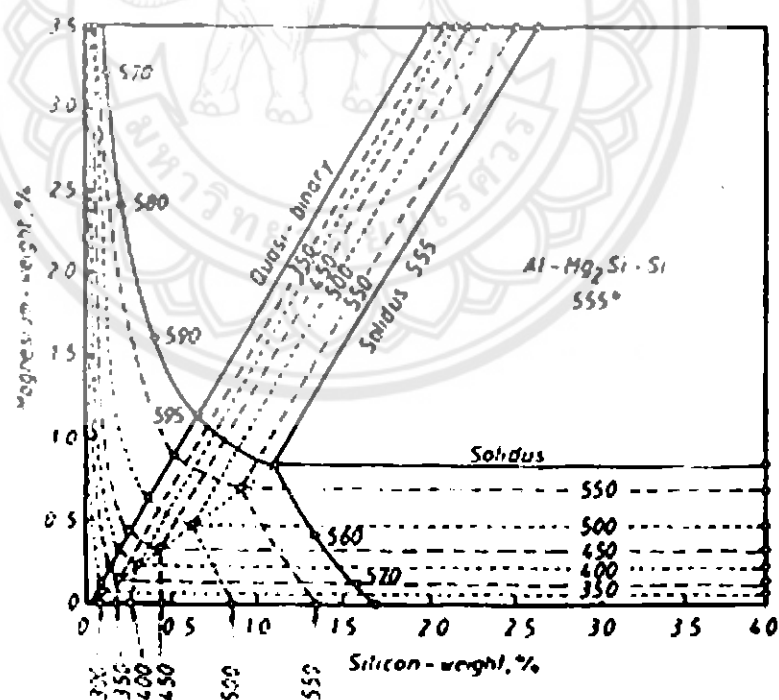
ร้อยละ 4.75 โดยน้ำหนัก จุดยูเทกติกของระบบสามองค์ประกอบบนพื้นผิวลิควิดัส ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสของอะลูมิเนียม แมกนีเซียมซิลิไซด์ และซิลิคอนเกิดที่อุณหภูมิ 555 องศาเซลเซียส โดยมีส่วนผสมของแมกนีเซียมร้อยละ 4.97 โดยน้ำหนัก และซิลิคอนร้อยละ 12.95 โดยน้ำหนัก ความสามารถในการละลายสูงสุดของโลหะอะลูมิเนียม แมกนีเซียม ซิลิคอน ในสภาวะของแข็ง พิจารณาได้จากพื้นผิวโซลิดัส (Solidus Surface) ดังรูปที่ 2.11 และพื้นที่โซลิวส (Solvus Surface) ซึ่งแสดงความสามารถในการละลาย ดังรูปที่ 2.12 ที่อุณหภูมิยูเทกติก 595 องศาเซลเซียส บนเส้นองค์ประกอบเทียม ประกอบด้วย แมกนีเซียมร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก และซิลิคอนร้อยละ 0.67 โดยน้ำหนัก จุดยูเทกติกของระบบสามองค์ประกอบบนพื้นผิวโซลิดัส และโซลิวสมีอะลูมิเนียม แมกนีเซียม-ซิลิไซด์ และซิลิคอนขึ้นที่อุณหภูมิ 555 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยแมกนีเซียมร้อยละ 0.85 โดยน้ำหนัก และซิลิคอนร้อยละ 1.10 โดยน้ำหนัก (King, 1987)



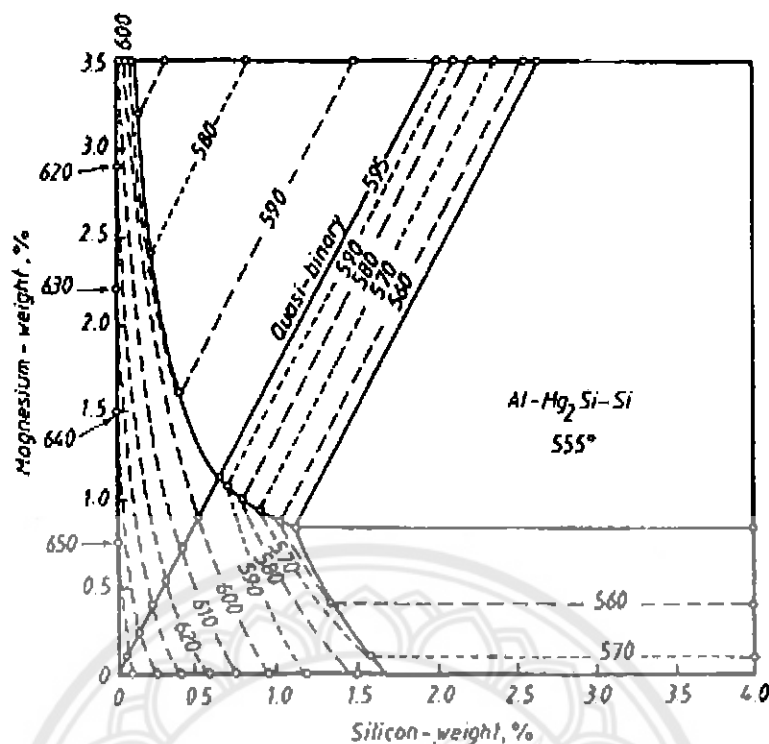
รูปที่ 2.9 แผนภาพวัฏภาคแสดงพื้นผิวลิควิดัสของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน
ที่มา : ASM (2002)



รูปที่ 2.10 แผนภาพวิภาคแสดงพื้นผิวลิกวิดัสของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน
ที่มา : King (1987)



รูปที่ 2.11 แผนภาพวิภาคแสดงพื้นผิวลิกวิดัสของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน
ที่มา : King (1987)



รูปที่ 2.12 แผนภาพวัฏภาคแสดงพื้นผิวโซลิวส์ ซึ่งแสดงความสามารถในการละลายของธาตุในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน

ที่มา : King (1987)

2.2.5 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 เป็นอะลูมิเนียมผสมแบบไฮเปอร์ยูเทกติกซึ่งมีซิลิคอนมากกว่าร้อยละ 11.7 และมีธาตุหลักประกอบด้วย อะลูมิเนียม ซิลิคอน และทองแดง ซึ่งมีสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่

2.2.5.1 ทนต่อการสึกหรอซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมที่มีซิลิคอนบริสุทธิ์ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งสูง มีการกระจายตัวในโครงสร้างยูเทกติกที่เหนียว และแกร่ง

2.2.5.2 ความสามารถในการหล่อที่ดี เป็นผลมาจากที่อะลูมิเนียมผสมมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวที่สูง จึงทำให้อะลูมิเนียมผสมหลอมเหลวสามารถไหลเข้าแบบหล่อได้ดี

2.2.5.3 ความถ่วงจำเพาะต่ำ เนื่องจากซิลิคอนเป็นธาตุหนึ่งที่ผสมลงในอะลูมิเนียมแล้วสามารถลดความถ่วงจำเพาะของอะลูมิเนียมผสมลงได้

2.2.5.4 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ เนื่องจากซิลิคอนเป็นธาตุที่มีสัมประสิทธิ์การขยายเนื่องจากความร้อนต่ำ

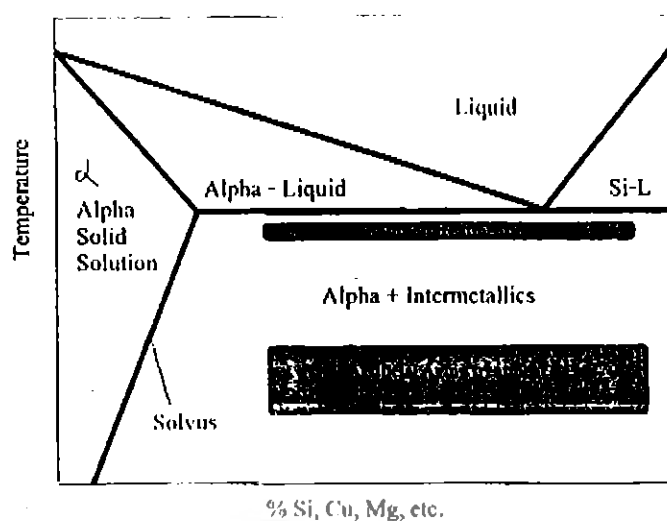
ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันทั่วไปแล้วว่าอะลูมิเนียมผสมชนิดนี้มีขนาดซิลิคอนปฏุมที่ละเอียด จะมีสมบัติที่ดีมากกว่าอะลูมิเนียมที่มีขนาดซิลิคอนปฏุมที่ใหญ่ และหยาบ การนำไปใช้งานเหมาะสมที่สุดกับงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอ และความแข็งแรงสูง ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น กระจกกสูบ คุมล้อ และปลอกสูบ เป็นต้น (เขาวลิต, 2547-2548)

2.3 การเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมหล่อโดยกรรมวิธีทางความร้อน

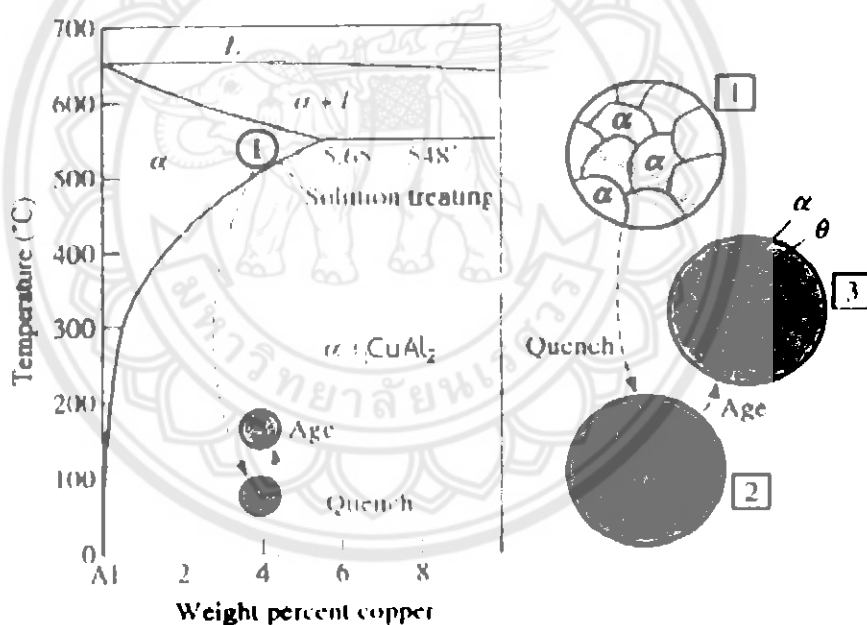
กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อได้มีการกำหนดสัญลักษณ์ของกระบวนการ โดยสมาคมงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา ตามกระบวนการการให้ความร้อน (Pearce, 2002) ดังนี้

- F โลหะหล่อที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนใดๆ
- O โลหะหลังการบ่มแข็ง
- T4 โลหะผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็ง (Solution Heat Treatment) ตามด้วยการบ่มแข็งตามธรรมชาติ
- T5 โลหะที่ผ่านการบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) เพียงอย่างเดียว
- T6 โลหะผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็ง ตามด้วยการบ่มแข็งเทียม
- T7 โลหะผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็ง ตามด้วยการปรับให้คงสภาพ (Stabilized)

นอกจากนี้ Buha และคณะ (2005, 2007) ได้เสนอแนวทางของกรรมวิธีทางความร้อน ที่ใช้สัญลักษณ์ T6 ด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งกรรมวิธีทางความร้อนของโลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมส่วนใหญ่ประกอบด้วย 3 กระบวนการย่อย ได้แก่ การทำเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิสูง เพื่อปรับให้องค์ประกอบภายในเฟสปฏุม α -Al ให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ และเกิดเป็นสารละลายอิ่มตัวของแข็งยิ่งยวด จากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เพื่อรักษาสภาพของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดไว้ให้ได้ α -Al ที่เป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดที่อุณหภูมิห้อง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อให้สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดเกิดตกตะกอนขึ้นภายในเฟส α -Al โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้สามารถประมาณได้จากแผนภาพวัฏภาคของโลหะผสมนั้น (ASM, 2002) ดังตัวอย่างรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม (Pearce, 2548) และรูปที่ 2.14 แสดงลักษณะเหมือนเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีทางความร้อนในโลหะผสมอะลูมิเนียม (Askeland, 1994)



รูปที่ 2.13 แผนภาพวิภาคแสดงช่วงอุณหภูมิกรรมวิธีทางความร้อน
ที่มา : Pearce (2548)



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงลักษณะเสมือนของเฟสที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีทางความร้อน
ที่มา : Askeland (1994)

2.3.1 การอบเป็นสารละลายของแข็ง (Solution Heat Treatment)

จากลักษณะการเกิดเฟสตามแผนภาพวิภาครูปที่ 2.11 พบว่าความสามารถในการละลายของอะลูมิเนียม แมกนีเซียม และซิลิคอนในสารละลายของแข็ง α -Al มีค่าลดลงตามแนวเส้นโซลวัส เมื่ออุณหภูมิต่ำลง กรณีของความไม่สมดุลทำให้ปริมาณการเกิดสารประกอบระหว่างโลหะมีสูงขึ้น ซึ่งเกิดระหว่างการเย็นตัวของงานหล่อช่วงปฏิบัติการอายุเทคติกของการเปลี่ยนสภาพจากของเหลว

ไปเป็นของแข็ง สารประกอบระหว่างโลหะเหล่านี้ มีลักษณะหยาบ อย่างไรก็ตามสามารถละลายกลับเข้าสู่โครงสร้างหลักได้ด้วยการอบซ้ำที่ระดับอุณหภูมิต่ำกว่าจุดยูเทกติกเล็กน้อย สำหรับสภาพสมดุล ปริมาณสารประกอบระหว่างโลหะที่มีส่วนผสมเป็นยูเทกติกก็ยังคงมีอยู่ แต่จะไม่เกิดผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับระบบแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามการอบเป็นสารละลายของแข็งนี้อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะดั้งเดิมของโครงสร้างยูเทกติกที่เป็นเหลี่ยมมุมแหลมคม ไปเป็นลักษณะที่กลมมนมากขึ้นได้ การคงอุณหภูมิไว้ประมาณ 4–12 ชั่วโมง จะช่วยให้ความสามารถในการละลายของธาตุผสมเกิดขึ้นได้มากที่สุด และทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอะตอมที่เป็นตัวถูกละลายอยู่ในสารละลายของแข็งของ α -Al และเมื่ออุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจะกลายเป็นสารละลายของแข็งอิมพัลย์ยวด อุณหภูมิสำหรับการอบเป็นสารละลายของแข็งจะใกล้เคียงกันกับการเกิดสารประกอบยูเทกติก โดยจะต่ำกว่าเล็กน้อย ดังนั้น จึงต้องมีความระมัดระวังเรื่องอุณหภูมิอย่างเข้มงวด เพื่อหลีกเลี่ยงการหลอมของวัสดุในระหว่างการอบ โดยทั่วไปจะใช้เตาที่มีการอัดอากาศภายในเตาตลอดเวลา เพื่อให้อุณหภูมิภายในเตามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ งานหล่อที่ได้รับอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน อาจเกิดความร้อนสะสมเฉพาะจุด และเกิดการหลอมเฉพาะจุดในบริเวณเล็กๆ ได้ เช่น บริเวณระหว่างโครงสร้างเดนไดรต์ นอกจากนี้การเกิดความร้อนสะสมสูงในชิ้นงานจะเกิดผลเสียอย่างถาวร อาจถึงขั้นสูญเสียสมบัติจนไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ และสำหรับงานหล่อทั้งแบบเทขึ้นรูป (Gravity) และแบบใช้แรงดัน (Pressure) สามารถเกิดการตกตะกอนได้โดยไม่ต้องผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็ง เนื่องจากอัตราการเย็นตัวหลังการหล่อพอเพียงสำหรับการละลายของอะตอมที่มากเกินไปในโครงสร้างผลึก อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบเทขึ้นรูป จึงมีความจำเป็นต้องผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็งก่อนที่จะทำการบ่มแข็ง (Pearce, 2548)

2.3.2 การชุบน้ำ (Quenching)

เป็นการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อคงสภาพของการเป็นสารละลายของแข็งอิมพัลย์ยวด ณ อุณหภูมิสูง ให้เป็นสารละลายของแข็งอิมพัลย์ยวดที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อยอะตอมบางส่วนจะเคลื่อนที่มารวมตัวกันตามบริเวณรอยต่อเกรนหรือในโครงสร้างพื้น (Matrix) การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว สามารถทำได้หลายรูปแบบ เพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดตะกอนที่มีผลให้สมบัติทางกล หรือสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนแย่ลง ส่วนใหญ่ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่น และที่ผ่านการขึ้นรูปแบบอัดฉีดจะทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ด้วยการแช่ในน้ำเย็น หรือฉีดพ่นด้วยละอองของน้ำเย็น ส่วนชิ้นงานที่มีความซับซ้อน มีทั้งหนา และบาง อยู่ในชิ้นเดียวกัน เช่น ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป ใช้วิธีทำให้เย็น โดยแช่ในน้ำร้อนช่วง 65–80 องศาเซลเซียส ในน้ำเดือด หรือในสารละลายพอลิอัลคิลีนไกลคอล (Polyalkylene Glycol) หรือของเหลวอื่นๆ (ASM, 2002) เนื่องจากเป็นความเข้าใจว่า ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ดังกล่าวจะช่วยให้

วัสดุมีอัตราการเย็นตัวที่เพียงพอ โดยไม่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานมากเกินไป (Pearce, 2002)

2.3.3 การบ่มแข็ง (Aging)

หลังจากผ่านการทำเป็นสารละลายของแข็ง และทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การบ่มแข็งให้แข็ง ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging) ซึ่งเป็นการวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง และการบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) โดยใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง โลหะบางกลุ่มอยู่ในอุณหภูมิห้องเพียงไม่กี่วัน ก็สามารถเกิดตะกอน และทำให้มีค่าจุดคราก (Yield) สูงเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานหลายประเภท แต่สำหรับโลหะบางกลุ่มต้องอาศัยความร้อนในการเกิดตะกอน เพื่อเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรง โดยเฉพาะในกลุ่มโลหะรีด และโลหะหล่อ นอกจากนี้ยังมีโลหะผสมอื่นที่ผ่านการบ่มแข็งแล้ว จะค่อยๆ เกิดตะกอนขึ้นภายหลัง หรือในขณะที่นำไปใช้งาน (ASM, 2002) ซึ่งรายละเอียดของทั้ง 2 วิธี มีดังนี้

2.3.3.1 การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging)

โลหะที่บ่มแข็งด้วยวิธีนี้ทำในโลหะผสม ส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม 2xx.x กลุ่ม 3xx.x ที่มีทองแดงเป็นส่วนผสม โดยประกอบด้วยการทำเป็นสารละลายของแข็ง ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว และปล่อยให้เกิดตะกอนเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึง ความเหนียว และสามารถต้านทานความล้าได้สูง โลหะผสมที่จะเพิ่มความแข็งด้วยวิธีนี้ เมื่อถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วแล้ว จะต้องมียะตอมละลายอยู่อย่างอิ่มตัวยิ่งยวด เพื่อให้เกิดการตกตะกอนได้ภายในทันที และความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน และตะกอนนั้นจะเริ่มเข้าสู่สภาวะเสถียรใน 4-5 วัน อย่างไรก็ตามในโลหะผสมกลุ่ม 2xx.x และกลุ่ม 3xx.x จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง และจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลอยู่ตลอดเวลาเป็นเวลานานปี (ASM, 2002)

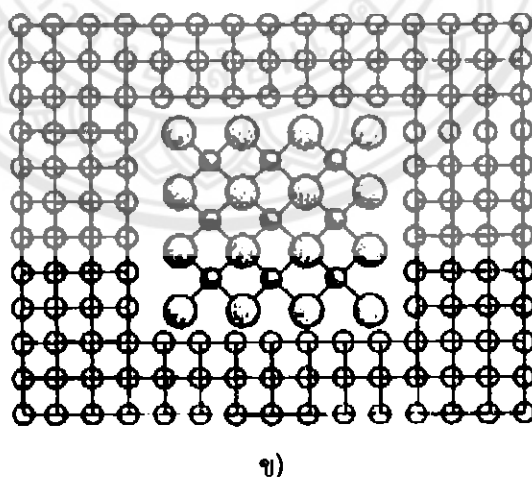
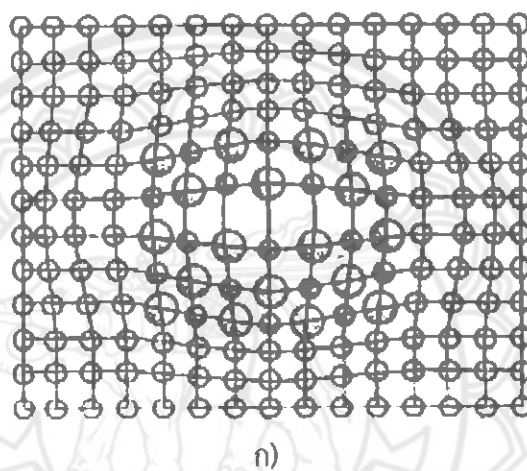
2.3.3.2 การบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging)

โลหะอะลูมิเนียมหล่อผสมส่วนใหญ่ต้องอาศัยความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องในการเกิดตะกอน จากกรณีนี้โดยทั่วไปจะบ่มแข็งที่อุณหภูมิตำระหว่างช่วง 150-250 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน เพื่อให้ตะกอนที่เกิดในระหว่างการบ่มแข็งมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ (Pearce, 2002) ส่วนสมบัติทางกลสุดท้ายที่ต้องการขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง ดังนั้นจึงต้องนำเวลาในการบ่มแข็งมาพิจารณาด้วยเสมอ นอกจากนี้ยังพิจารณาระบบของโลหะผสมที่ใช้ด้วย เฟสที่ตกตะกอนจะแตกต่างกัน

การทำให้อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงในระดับที่ดีที่สุด จะต้องทำให้โครงสร้างพื้น และตะกอนเกิดลักษณะโคฮีเรนต์ (Coherent) หรือเกิดในลักษณะเซมิโคฮีเรนต์ (Semi-Coherent) แสดงดังรูปที่ 2.15 ก) และมีการกระจายตัวของตะกอนอย่างสม่ำเสมอ ชิ้นงานจะมีความเค้นสูงเป็นพิเศษ เพราะดิสโลเคชัน (Dislocation) เคลื่อนที่ผ่านตะกอนลักษณะดังกล่าวได้ยาก

ความเครียดที่เกิดจากแรงเฉือนจึงสูง ซึ่งลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีขนาดประมาณ 10–100 นาโนเมตร (มนัส, 2541)

การบ่มแข็งนานขึ้นจะส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงลดลง เรียกว่า การบ่มนานเกินไป (Overaging) โดยตะกอนละเอียดจะลดลง แล้วแทนที่ด้วยอนุภาคที่หยาบ โดยจะมีการแยกชัดเจนระหว่าง โครงสร้างพื้นกับผิวของตะกอน แสดงดังรูปที่ 2.15 ข) ซึ่งแสดงลักษณะตะกอนอินโคฮีเรนต์ (Incoherent) ในโครงสร้างหลัก และมีแนวโน้มที่ทำให้ความแข็งแรงที่เกิดขึ้น ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งอาจเป็นเพราะช่องว่างระหว่างอะตอมที่เพิ่มขึ้น และจำนวนตะกอนลดลง สมบัติทางกลจึงลดลง (Pearce, 2002)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างพื้น และลักษณะการเกิดตะกอน

ก) ลักษณะตะกอนแบบโคฮีเรนต์

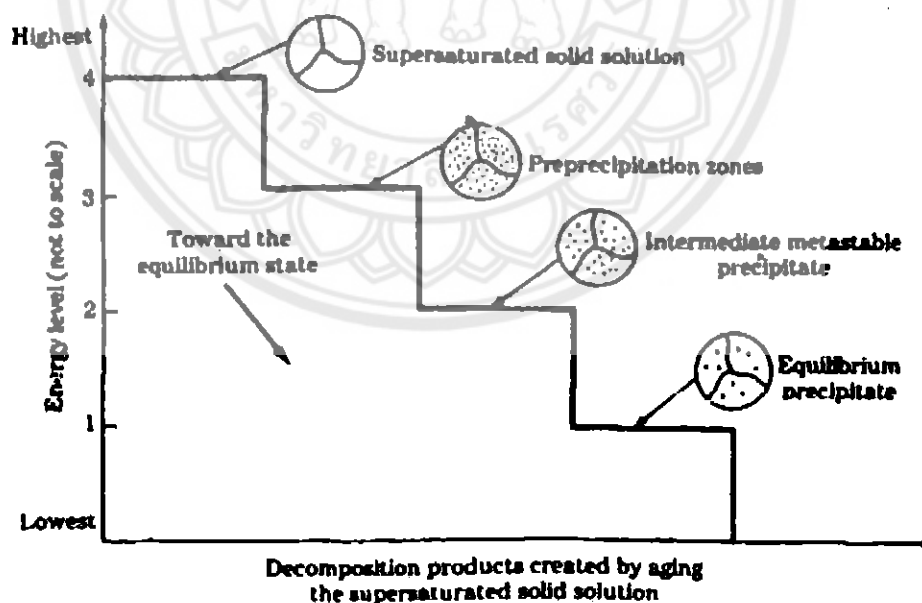
ข) ลักษณะตะกอนแบบอินโคฮีเรนต์

ที่มา : Askeland (1994)

2.3.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของสารละลายของแข็งอัมตั่วยงวดในระหว่างการบ่มแข็ง

โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอนแล้ว ในขั้นตอนแรกจะอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอัมตั่วยงวด ในสภาวะนี้โลหะผสมจะมีพลังงานสูงมาก แสดงดังรูปที่ 2.16 ที่ระดับพลังงานเท่ากับ 4 ที่ระดับพลังงานนี้โลหะผสมจะไม่อยู่ตัว และมีแนวโน้มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งอัมตั่วยงวดไปยังเฟสที่มีพลังงานต่ำกว่า ซึ่งอาจจะเป็น Metastable Phase หรือเฟสสมดุล (Equilibrium Phases) ขึ้นโดยเกิดขึ้นเอง

เมื่อโลหะผสมที่อยู่ในสภาวะสารละลายอัมตั่วยงวดถูกทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีพลังงานกระตุ้นค่อนข้างน้อย อะตอมอาจจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเรียกว่า Precipitation Zones หรือ GP Zones แสดงด้วยจุดดำๆ ดังในระดับพลังงาน 3 ของรูปที่ 2.16 และเมื่อทำการบ่มแข็งต่อไป หรือมีพลังงานกระตุ้นมากเพียงพอโดยการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็ง บริเวณ GP Zones นี้จะมีจุดดำๆ ที่ใหญ่ขึ้น (Intermediate Metastable Precipitation) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และถ้ายังมีการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงต่อไป หรือมีพลังงานกระตุ้นสูงขึ้นเพียงพอ Intermediate Metastable Precipitation เหล่านี้จะเปลี่ยนเป็นเฟสที่มีความสมดุลมากขึ้น ดังแสดงในระดับพลังงาน 1 (รศ. แม้น และสมชัย, 2544) ของรูปที่ 2.16

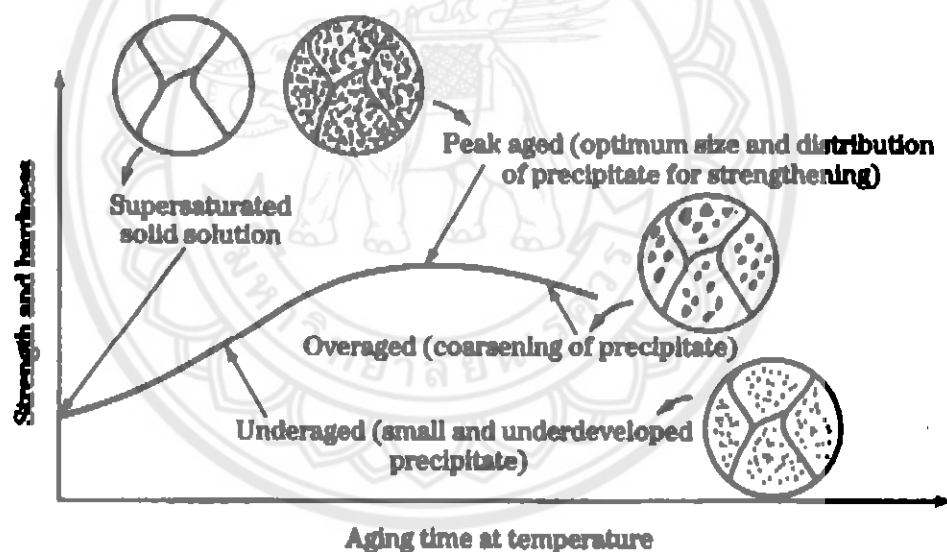


รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของโลหะผสมที่สามารถเพิ่มความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอน และถูกทำให้อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอัมตั่วยงวดโดยการบ่มแข็ง

ที่มา : รศ. แม้น และสมชัย (2544)

2.3.5 ผลของเวลาในการทำการบ่มแข็งต่อความแข็ง และความแข็งแรงของโลหะผสมที่สามารถถูกเพิ่มความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอน

ผลของการบ่มแข็งต่อความแข็งของโลหะผสมที่ผ่านขั้นตอนการอบละลาย และชุบน้ำ สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้ง (Aging Curve) กราฟของเส้นโค้งการบ่มแข็งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และความแข็งแรงกับเวลาในการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าความแข็ง และความแข็งแรงของสารละลายของแข็งอิมิตัววยวดยิ่งเท่ากับจุดตัดบนแกน X ที่เวลาเท่ากับศูนย์ เมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น ในบริเวณ GP Zones จะเริ่มเกิดขึ้นและขนาดก็ค่อยๆ ใหญ่ขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นมีความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวลดลง (รูปที่ 2.17) จนกระทั่งมีค่าสูงสุด เมื่ออุณหภูมิในการบ่มแข็งสูงเพียงพอ ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เกิด Intermediate Metastable Precipitate และถ้ายังมีการบ่มแข็งต่อไป Intermediate Metastable Precipitate จะเริ่มหยาบขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นจะเริ่มมีความแข็ง และความแข็งแรงลดลง (รศ. แมน และสมชัย, 2544)



1596 9400

4/5.

02531

2553

รูปที่ 2.17 เส้นโค้งในการบ่มแข็ง (ความแข็ง และความแข็งแรงกับเวลา) ที่อุณหภูมิหนึ่งของโลหะผสมที่สามารถทำการเพิ่มความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอนได้

ที่มา : รศ. แมน และสมชัย (2544)

2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ สามารถที่จะช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดได้สูงสุดในระดับของช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตร เพียงเท่านั้น (หรือที่ต่ำที่สุดก็อยู่ในช่วงระดับความละเอียด 200-400 นาโนเมตร) (วิรุฑ, 2553)

วิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

- ก. ตั้งลำกล้องให้ตรง
- ข. เปิดไฟเพื่อให้แสงเข้าลำกล้องได้เต็มที่
- ค. หมุนเลนส์ใกล้วัตถุ ให้เลนส์ที่มีกำลังขยายต่ำสุดอยู่ในตำแหน่งแนวของลำกล้อง
- ง. นำสไลด์ที่จะศึกษามาวางบนแท่นวางวัตถุ โดยปรับให้อยู่กลางบริเวณที่แสงผ่าน
- จ. ค่อยๆ หมุนปุ่มปรับภาพหยาบให้กล้องเลื่อนขึ้นช้าๆ เพื่อหาระยะภาพ แต่ต้องระวังไม่ให้เลนส์ใกล้วัตถุกระทบกับสไลด์ตัวอย่าง เพราะจะทำให้เลนส์แตกได้
- ฉ. ปรับภาพให้ชัดเจนขึ้นด้วยปุ่มปรับภาพละเอียด ถ้าวัตถุที่ศึกษาไม่อยู่ตรงกลางให้เลื่อนสไลด์ให้มาอยู่ตรงกลาง
- ช. ถ้าต้องการให้ภาพขยายใหญ่ขึ้นให้หมุนเลนส์ ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยายสูงกว่าเดิมมาอยู่ในตำแหน่งแนวของลำกล้อง จากนั้นปรับภาพให้ชัดเจนด้วยปุ่มปรับภาพละเอียดเท่านั้น ห้ามปรับภาพด้วยปุ่มปรับภาพหยาบเพราะจะทำให้ระยะของภาพ หรือจุดโฟกัสของภาพเปลี่ยนไป
- ซ. บันทึกกำลังขยายโดยหาได้จากผลคูณของกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุกับกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา

การเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง

- ก. นำชิ้นงานมาขัดกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 500, 1000
- ข. นำชิ้นงานไปขัดละเอียด
- ค. ตรวจดูโครงสร้าง

2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้าง และสมบัติบางประการของสสาร ค่าความชัดลึก (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งนี้เป็นเพราะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ภาพที่ได้มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDXS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WED) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีอีกด้วย และในโครงการวิจัยนี้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า EDXS เพื่อตรวจหาธาตุในตัวอย่างโดยใช้หลักการของรังสีเอกซ์เรย์แสดงผลในรูปแบบของตัวเลข กราฟ และวิเคราะห์ปริมาณ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์ อื่นหลายสาขา (ปัญญา และศุภกาญจน์ , 2544)

2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ

2.5.1.1 การดูลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของพื้นผิวโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของ Detector ได้ โดยแบ่งเป็น

ก. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Secondary Electron จะได้ภาพที่เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความสูงต่ำ ขรุขระ ที่เกิดขึ้นจริงบนตัวอย่าง และสามารถวัดขนาดต่างๆ บนตัวอย่างนั้นได้

ข. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Back Scattered Electron จะได้ภาพที่มีลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุนั้น ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

2.5.1.2 การวิเคราะห์ธาตุสามารถใช้ข้อมูลได้เป็น 2 ลักษณะ คือ หาธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างว่ามีธาตุใดบ้าง โดยแสดงออกมาเป็นกราฟ และบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุนั้นๆ และสามารถบอกเป็นพื้นที่ว่าบริเวณใดมีธาตุใดอยู่บ้าง

2.5.2 ลักษณะของตัวอย่าง และชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบที่มีต้องการสภาพความเป็นสุญญากาศสูง การเตรียมตัวอย่างที่จะศึกษาต้องแห้ง ไม่มีความชื้น และไม่ปนเปื้อนสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น น้ำมัน) เพราะเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้น หรือสารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ ขัดขวางเส้นทางของอิเล็กตรอนทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจน อีกทั้งโมเลกุลเหล่านี้อาจไปเกาะยังส่วนต่างๆ ของกล้อง เช่น ผิวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีอายุการใช้งานสั้นลง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ก. การเตรียมตัวอย่างในแบบทั่วไป

ก.1 อยู่ในสถานะของแข็งทุกลักษณะ เช่น เป็นผง เป็นแผ่นเป็นแท่ง ฯลฯ

ก.2 ถ้ามีขนาดใหญ่ต้องตัดส่วนที่จะดูให้เล็กอยู่ที่ประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ก.3 ต้องแห้งไม่มีความชื้น ไม่มีการระเหยของสารใดๆ และไม่มีการฟุ้งกระจายของ

ตัวอย่าง

ก.4 ถ้าตัวอย่างมีการนำไฟฟ้าจะสามารถนำเข้าสู่เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดูได้เลย

ก.5 ถ้าตัวอย่างไม่มีการนำไฟฟ้า หรือนำได้เพียงบางจุด จะต้องมีการนำไปเคลือบทอง

ข. การเตรียมตัวอย่างในแบบตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า

ข.1 โดยทั่วไปจะเหมือนการเตรียมตัวอย่างแบบทั่วไป

ข.2 ต้องมีการเคลือบทองก็สามารถนำเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้

ข.3 การใช้งานในระบบนี้จะใช้ได้ง่ายกว่าแบบปกติ และเสียเวลามากกว่าแบบปกติ ดังนั้นจึงสามารถทำได้บางกรณีเท่านั้น

การเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าบางๆ (ประมาณ 100 อังสตรอม) ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง ทองผสมแพลทินัม และคาร์บอน การเคลือบด้วยทอง หรือทองผสมแพลทินัมจะให้ได้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน แต่จะทำให้ข้อมูลทางเคมีของเทคนิค EDXS บิดเบือนไปได้ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

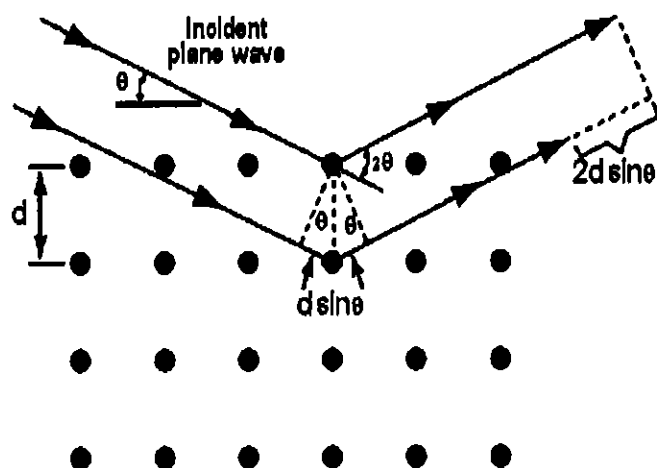
สำหรับตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจไม่ต้องทำการเคลือบได้ โดยเลือกให้ความต่างศักย์น้อยๆ (ต่ำกว่า 3kV) ซึ่งภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะไม่เกิดการสะสมประจุที่ผิว (Charging) เนื่องจากปริมาณกระแสเข้าให้เท่ากับกระแสออก หรือเลี้ยงไปใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบสุญญากาศต่ำแทน (บัญชา และศุภกาญจน์, 2544)

2.6 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

2.6.1 หลักการ และวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึก คือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอกซ์ ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ เท่ากับมุมตกกระทบ แสดงดังในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 Bragg 's Law

ที่มา : http://orionift.tripod.com/physics_phunnies.htm (2553)

2.6.2 สมบัติเฉพาะของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer)

- 2.6.2.1 เพื่อศึกษา และวิเคราะห์วัสดุว่ามีสารประกอบชนิดใดบ้าง
- 2.6.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารผสมหลังทำปฏิกิริยา
- 2.6.2.3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบ
- 2.6.2.4 สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1700 องศาเซลเซียส

เซลเซียส



รูปที่ 2.19 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

2.6.3 การเตรียมตัวอย่าง สามารถทำได้ 3 วิธี ดังนี้

2.6.3.1 การเตรียมตัวอย่างแบบมาตรฐาน กรณีที่มีตัวอย่างในปริมาณมาก

- ก. นำแผ่นจับยึดชิ้นงานติดกับแผ่นแก้วด้านใดด้านหนึ่งด้วยเทปใส
- ข. บดผงตัวอย่างให้มีความละเอียดมากที่สุดผ่านตะแกรง 45 ไมโครเมตร หรือเท่าที่บดได้ โรยลงช่องหลุมใส่ชิ้นงานใช้แผ่นแก้วกดตัวอย่างเบาๆ พอประมาณ แล้วปาดตัวอย่างที่เกินทิ้ง นำฝาหลังปิดเข้ากับที่จับยึดชิ้นงาน
- ค. แกะเทปใสที่ยึดแผ่นแก้วออกแล้วนำแผ่นจับยึดชิ้นงานเสียบเข้าแกนกับยึดตัวอย่างที่เครื่อง ระวังอย่าให้นิ้วโดนบริเวณที่มีตัวอย่าง

2.6.3.2 การเตรียมตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย

- ก. ทาจารบี (Super grease) ลงบนแผ่นสไลด์บางๆ
- ข. โรยผงตัวอย่างลงบนสไลด์ แล้วใช้นิ้วมือเคาะด้านข้างเพื่อให้ตัวอย่างกระจายทั่วบริเวณที่ทาจารบี
- ค. ใช้แผ่นสไลด์ตัดแนวตัวอย่างให้เป็นเส้นตรง แล้วนำแผ่นตัวอย่างเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่างที่เครื่อง

2.6.3.3 การเตรียมตัวอย่างที่เป็นชิ้น

- ก. ตัดตัวอย่างใหม่ขนาดความหนา 2.00 มิลลิเมตร
- ข. ใช้ด้านหนาที่เรียบที่สุดเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่างได้เลย

2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง เป็นการวัดความต้านทานต่อรอยกด รอยขีดข่วน หรือการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) ของวัสดุ ซึ่งความแข็งของวัสดุขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างพันธะ (ASTM B557, 2001) มีวิธีการทดสอบหลายวิธีที่นิยมเช่น บริเนลล์ (Brinell Hardness Test) ร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test) วิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) และนู๊ป (Knoop Hardness Tester) เป็นต้น วิธีการทั้งหลายนี้นิยมใช้กันทั่วไปในการทดสอบความแข็งทางวิศวกรรม และแต่ละวิธีมีกฎพื้นฐานเดียวกัน คือความแข็งวัดจากรอยกดที่เกิดขึ้นด้วยการให้น้ำหนักกดลงบนหัวกดที่ผิวของวัสดุในช่วงเวลาจำกัดโดยในการทดสอบครั้งนี้จะใช้วิธีการทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือลูกบอลคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภายใต้ภาระ 3000 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุที่อ่อนสามารถลดภาระที่ 1500 กิโลกรัมแรง หรือ 500 กิโลกรัมแรง เพื่อหลีกเลี่ยงรอยกดที่มากเกินไป ปกติจะคงภาระไว้ 10-15 วินาที ในกรณีเหล็กหล่อ และเหล็กกล้า และอย่างน้อย 30 วินาที ในกรณีโลหะอื่นๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เหลืออยู่บนวัสดุทดสอบ จะถูกวัดโดย

กล้องขยายกำลังต่ำ ค่าความแข็งคำนวณจากการหารภาระที่ใช้ด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด จะใช้สูตรคำนวณแสดงดังสมการที่ 2.1

$$BHN = \frac{\text{แรงที่ใช้กด}}{\text{พื้นที่ของรอยกด}} = \frac{P}{(\pi D/2) \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (2.1)$$

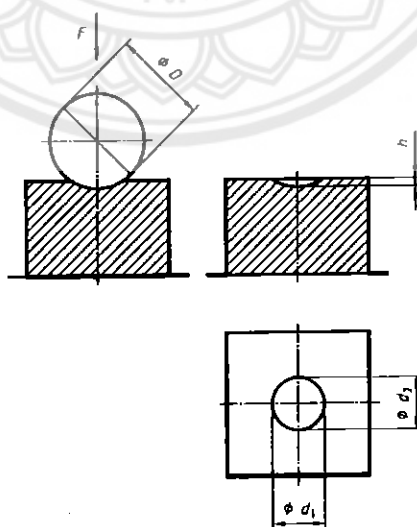
เมื่อ BHN = ค่าความแข็งบริเนลล์

P = ภาระ หน่วย กิโลกรัมแรง

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวกด หน่วย มิลลิเมตร

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด หน่วย มิลลิเมตร

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่ใช้คำนวณ เป็นค่าเฉลี่ยจากการอ่านค่าสองครั้งตั้งฉากกัน การแสดงค่าความแข็งแบบบริเนลล์สามารถแสดงให้เห็นสถานะของการทดสอบ เช่น 75 HB 10/500/30 หมายความว่า ค่าความแข็ง 75 ใช้ลูกบอลเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภาระ 500 กิโลกรัมแรง เป็นระยะเวลา 30 วินาที สำหรับการทดสอบโลหะที่มีความแข็งมาก อาจใช้ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์แทนลูกบอลเหล็ก เปรียบเทียบการทดสอบความแข็งบริเนลล์กับวิธีการทดสอบความแข็งแบบอื่นๆ ลูกบอลเหล็กของบริเนลล์สามารถสร้างรอยกดที่ลึก และกว้าง ดังนั้นการทดสอบความแข็งจะเฉลี่ยความแข็งปริมาณเนื้อวัสดุที่มากกว่า ซึ่งจะให้ความถูกต้องกับโครงสร้างเกรนที่ซับซ้อน และไม่สม่ำเสมอในความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ วิธีนี้ดีที่สุดเพื่อหาความแข็งมหภาค โดยเฉพาะวัสดุที่โครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (มอก., 2547)



รูปที่ 2.20 หลักการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

ที่มา : มอก. (2547)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yucel Birol (2008) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมชนิดไฮเปอร์ยูเทกติกของ A390 ที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งโดยวิธีรางเทหล่อเย็น และการขึ้นรูปแบบ Thixoforming โดยชิ้นงานที่ผ่านการหล่อทั้ง 2 แบบนั้น ได้นำมาทำการรวมวิธีทางความร้อนด้วยขั้นตอนการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบความแข็ง ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานอะลูมิเนียม A390 ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบ Thixoforming มีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานอะลูมิเนียม A390 ที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งโดยวิธีรางเทหล่อเย็น เนื่องจากชิ้นงานอะลูมิเนียม A390 ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบ Thixoforming โครงสร้างทางจุลภาคมีลักษณะเป็นแบบกลมๆ จึงทำให้มีค่าความแข็งที่สูงกว่า

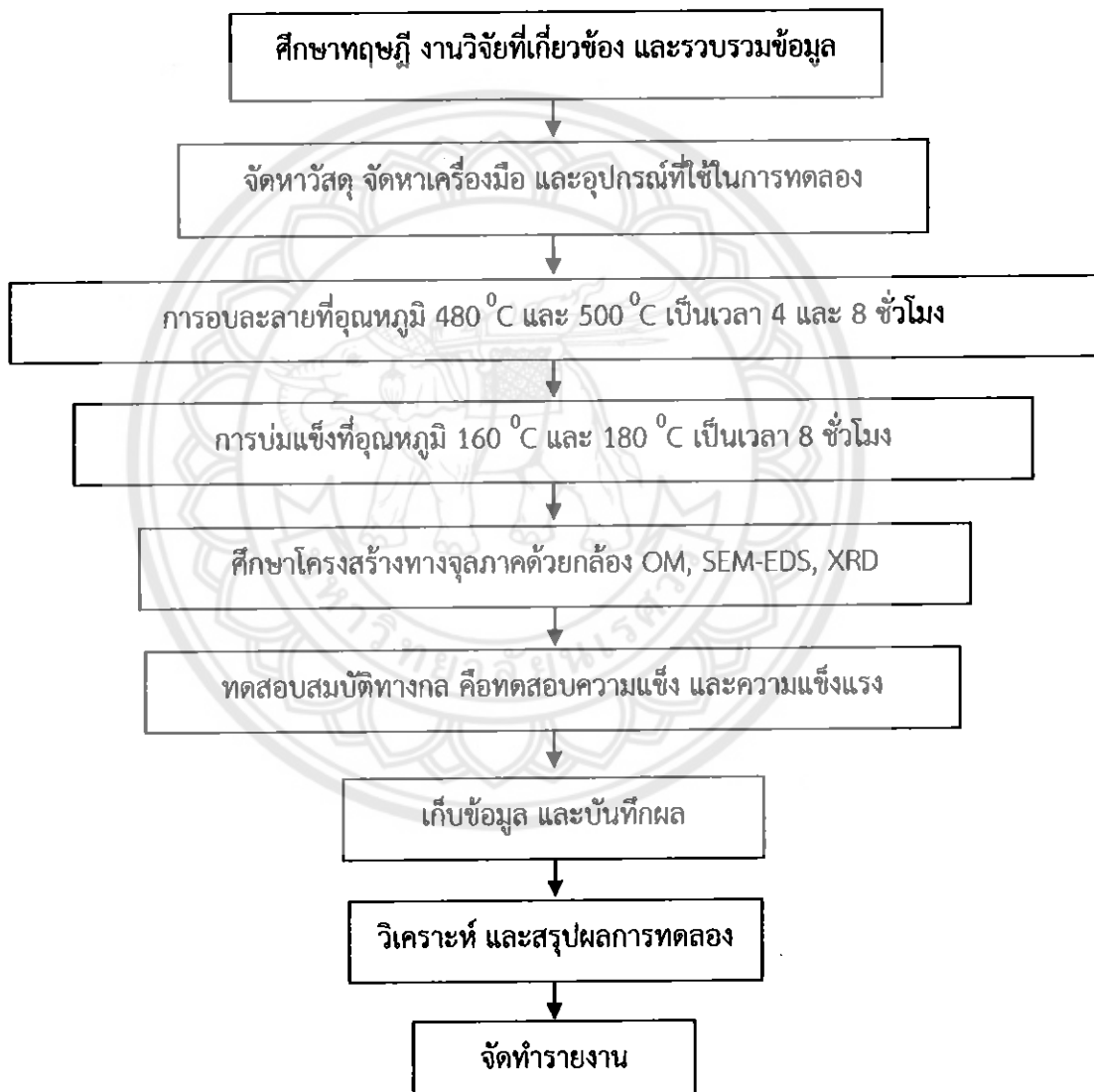
M. Gupta และ E.J. Lavernia (1995) ได้ทำการศึกษาผลของการขึ้นรูปโดยการหล่อแบบดั้งเดิม การขึ้นรูปแบบ Spray-Deposited ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติความแข็ง หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นงานอะลูมิเนียม-ซิลิคอน A390 โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 480, 490, 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ แล้วนำมาชุบน้ำ จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการหล่อแบบดั้งเดิมจะมีเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม และชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบ Spray-Deposited มีเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะกลมมนกระจายอยู่บนเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบ Spray-Deposited ซึ่งผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีค่าความแข็งสูงสุด และชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการหล่อแบบดั้งเดิมซึ่งผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงมีความแข็งสูงสุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ

ในการศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของ อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Si	17.4463	Cr	0.0906
Cu	5.0106	Pb	0.0431
Fe	1.0417	Ti	0.0324
Mg	0.5410	Sn	0.0177
Zn	0.3427	V	0.0093
Mn	0.2369	P	0.0058
Ni	0.1619	Al	Balance

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ข. เตาอบอุณหภูมิสูง
- ค. เครื่องขัดโลหะ
- ง. กระดาษทราย เบอร์ 180, 320, 500 และ 1000
- จ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียด 1 และ 0.3 ไมครอน

3.2.2.2 สารเคมี

- ก. ไฮโดรฟลูออริก (HF)
- ข. น้ำกลั่น

3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)
- ข. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron

Microscopy : SEM)

- ค. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)
- ง. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)
- จ. เครื่องทดสอบความแข็งแรง (Tensile Test)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 ศึกษาทฤษฎี และรวบรวมข้อมูล

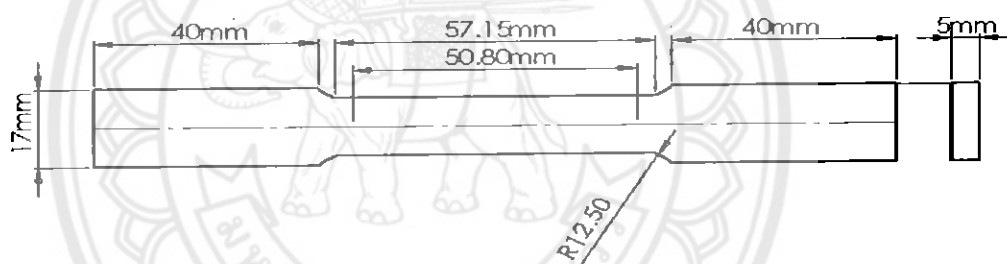
- ทฤษฎีเกี่ยวกับการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร
- ทฤษฎีเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมหล่อ
- ทฤษฎีเกี่ยวกับกรรมวิธีทางความร้อนโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

3.3.2 การจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ใช้ในการทดลองคือ เกรด A390 และผ่านการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร

3.3.3 นำชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อมาตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ

นำชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 มาตัดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการตามมาตรฐาน ASTM B557 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



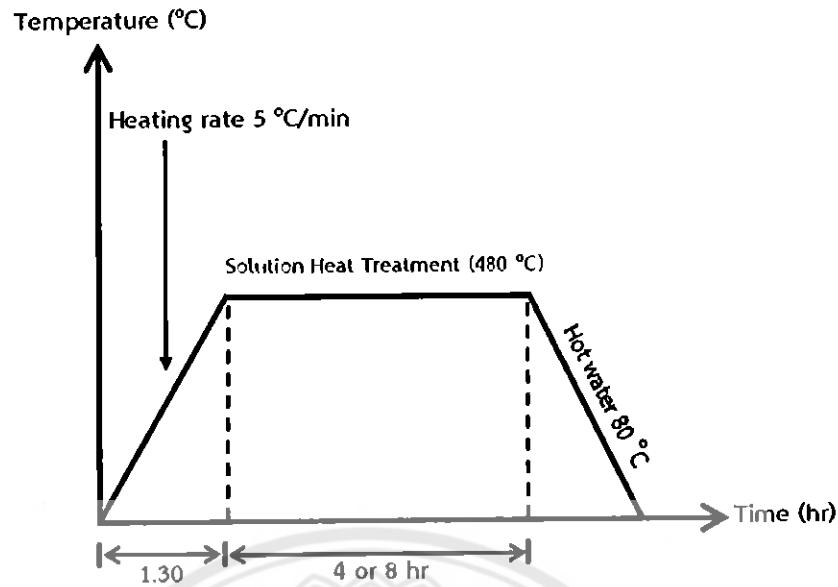
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่นำไปทดสอบแรงดึง

3.3.4 กรรมวิธีทางความร้อนโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (Precipitation Hardening)

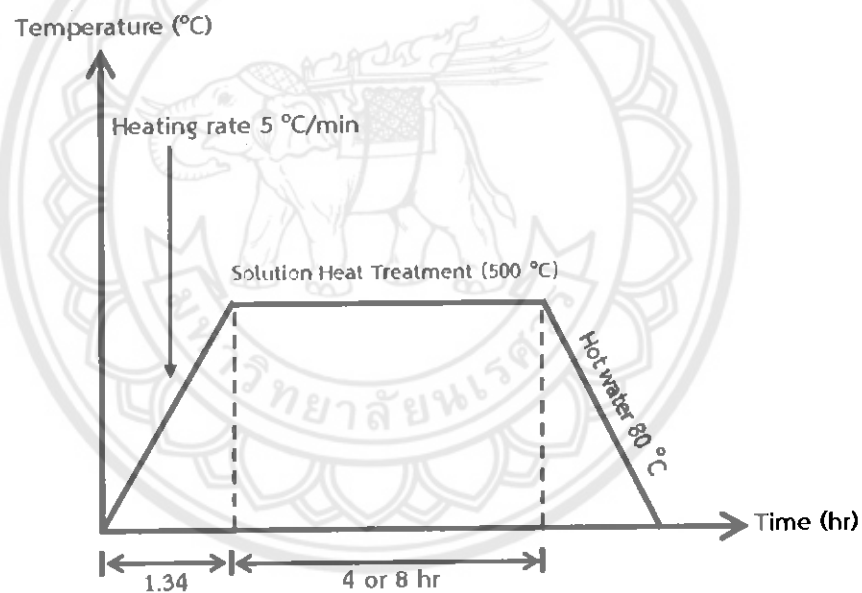
นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งประกอบด้วย

3.3.4.1 การอบละลาย (Solution Heat Treatment)

นำชิ้นงานไปทำกรรมวิธีทางความร้อนโดยวิธีการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ และออกมาจากเตา นำมาชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำมาทดสอบความแข็ง เพื่อหาค่าความแข็งสูงสุด ไปทำการบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4



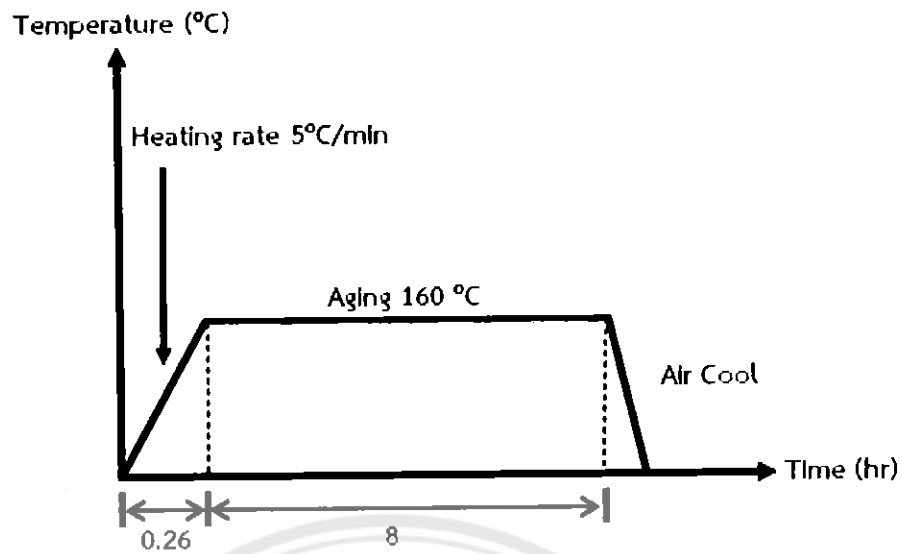
รูปที่ 3.3 การอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง



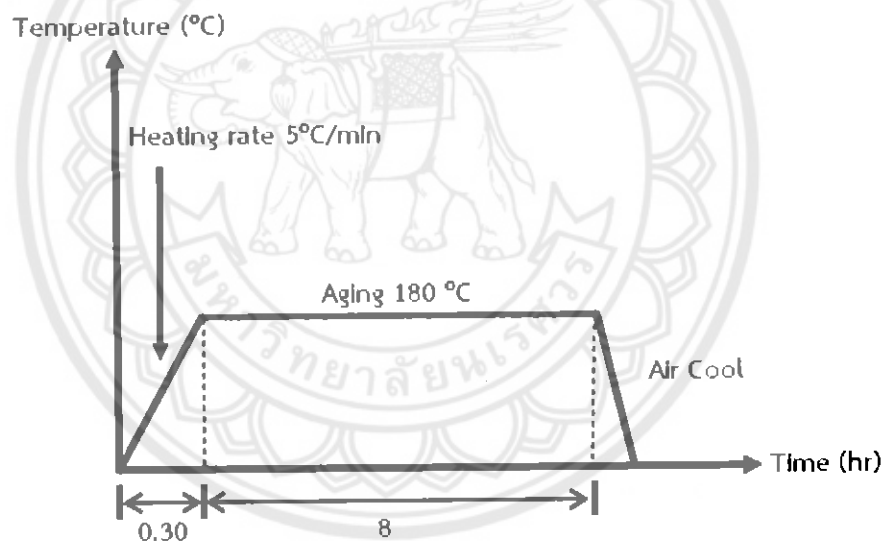
รูปที่ 3.4 การอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง

3.3.4.2 การบ่มแข็ง (Aging)

นำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย และเมื่อนำไปทดสอบความแข็งแล้วมีค่าความแข็งสูงสุดมาทำกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.3.5 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

3.3.5.1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

นำชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อดูโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน

ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

- นำชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Solution Heat Treatment and Aging) มาขัดด้วยกระดาษทราย จากเบอร์หยาบไปหาเบอร์ละเอียด ดังนี้ 180, 320, 500 และ 1000 ตามลำดับ

- นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดในขั้นต้นมาขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา (Alumina) ขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ
- นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดมากัดกรดไฮโดรฟลูออริก ร้อยละ 48 ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยการนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ด และเป่าให้แห้ง
- นำชิ้นงานที่กัดกรดเรียบร้อยแล้ว มาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

3.3.5.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาดูลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูโครงสร้างของชิ้นงานที่กำลังขยายสูง

ขั้นตอนการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

- นำชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาขัดด้วยกระดาษจากเบอร์หยาบไปหาละเอียด ดังนี้ 180, 320, 500 และ 1000 ตามลำดับ
- นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดในขั้นต้นมาขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา (Alumina) ขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ
- นำชิ้นงานที่ขัดละเอียดแล้วมากัดกรดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ร้อยละ 48 ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยการนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ด และเป่าให้แห้ง
- นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดแล้ว มาตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- ใช้เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) มาวิเคราะห์หาธาตุที่ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยจะเน้นที่เฟสแอลฟาอะลูมิเนียม (α -Al) เฟสซิลิคอนปฐมภูมิ เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียม (CuAl_2)

3.3.5.3 การศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

นำชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- นำชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาขัดด้วยกระดาษจากเบอร์หยาบไปหาละเอียด ดังนี้ 180, 320, 500 และ 1000 ตามลำดับ
- นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดในขั้นต้นมาขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา (Alumina) ขนาด 1 ไมครอน

- นำชิ้นงาน ไปตัดให้มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร
- นำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

3.3.6 ทดสอบสมบัติทางกล

3.3.6.1 การทดสอบความแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ โดยกดลงบนชิ้นงาน 10 จุดแบบสุ่ม จุดละประมาณ 15 วินาที แล้วหาค่าเฉลี่ย

ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

- นำชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาขัดด้วยกระดาษจากเบอร์หยาบไปหาละเอียด ดังนี้ 180, 320, 500 และ 1000 ตามลำดับ
- นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดในขั้นต้นมาขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา (Alumina) ขนาด 1 ไมครอน
- ใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ โดยมีน้ำหนักกด 62.5 กิโลกรัม กดลงบนชิ้นงาน 10 จุดแบบสุ่ม จุดละประมาณ 15 วินาที

3.3.6.2 การทดสอบความแข็งแรง

ทำการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง จำนวนชิ้นงานทั้งหมด 9 ชิ้นงาน

ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง

- นำชิ้นงานในสภาพหล่อ, สภาพหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และสภาพหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 เป็นเวลา 4 ชั่วโมงผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ขึ้นรูปให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM B557 สภาพละ 3 ชิ้นงาน
- ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง น้ำหนักดึง 50 กิโลนิวตัน ดึงชิ้นงานด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3.7 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน แล้วทำการสรุปผลการทดลอง

3.3.8 จัดทำรายงาน

จัดทำเอกสารรวบรวมผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

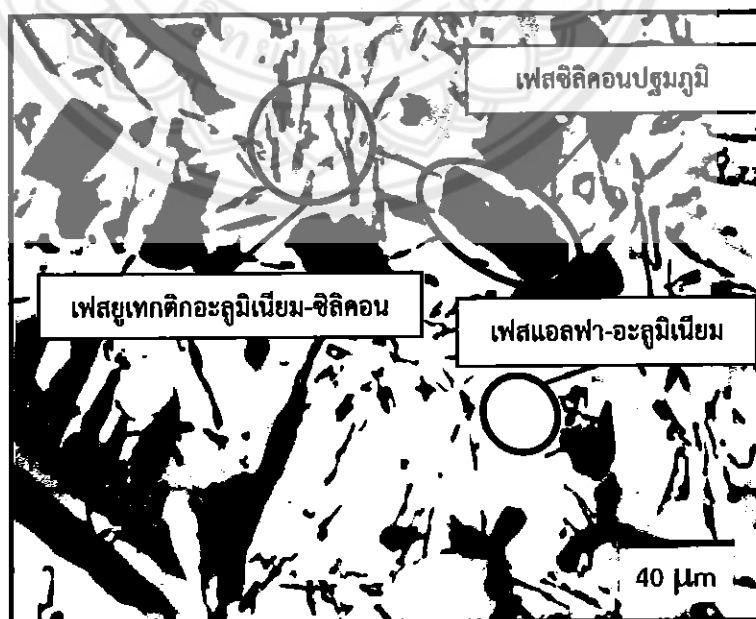
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ในสภาพหล่อ

4.1.1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 (อะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง) ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมผสมแบบไฮเพอร์ยูเทกติก ที่ได้ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วย เฟสซิลิกอนปฐมภูมิมีลักษณะเป็นแผ่นสีเทาเข้มขนาดใหญ่ เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม (α -Al) เป็นสีขาว เฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนมีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม และบริเวณที่เป็นสีเทาอ่อน แสดงดังรูปที่ 4.1 และการนับร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน พบว่ามีปริมาณเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนร้อยละ 41.684 โดยพื้นที่ของชิ้นงานในสภาพหล่อ ดังตารางที่ ข.5



รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

4.1.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

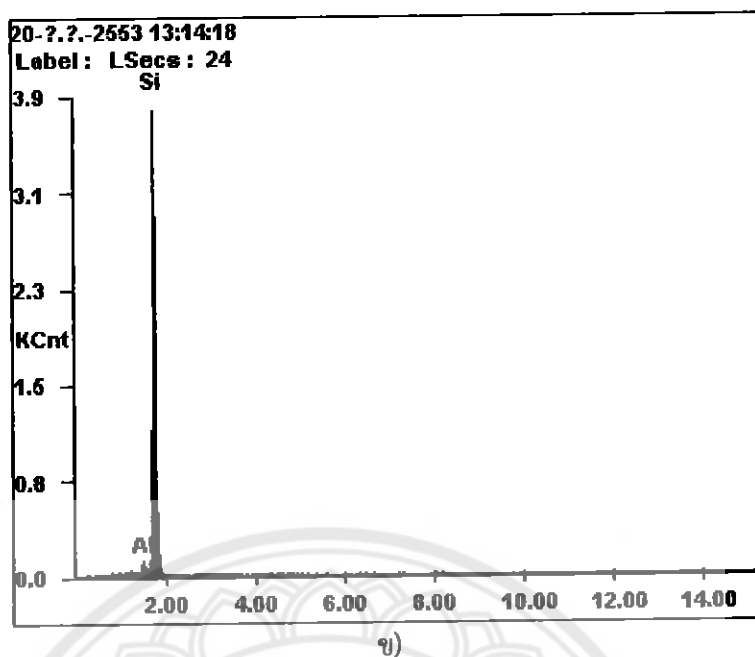
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงขึ้น ทำให้เห็นเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิที่ชัดลึกขึ้น โดยเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) พบว่าเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิในสภาพหล่อ มีองค์ประกอบของธาตุซิลิคอนและอะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่ามีธาตุซิลิคอนในปริมาณสูง เนื่องจากเมื่อเกิดการเย็นตัวของชิ้นงาน ผลึกของซิลิคอนจะเกิดขึ้นก่อน และมีปริมาณมากขึ้น โดยมีปริมาณของอะลูมิเนียมบางส่วนที่ละลายอยู่ในซิลิคอน จึงทำให้เห็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งซิลิคอนและอะลูมิเนียม แสดงดังตารางที่ 4.1



ก)

รูปที่ 4.2 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิในสภาพหล่อ

ก) ภาพ Back Scattered Electron Image (BEI) ของเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิของชิ้นงาน
ในสภาพหล่อ



รูปที่ 4.2 (ต่อ) การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสซิลิคอนปฐมภูมิในสภาพหล่อ

ข) สเปกตรัมของเฟสซิลิคอนปฐมภูมิของชิ้นงานในสภาพหล่อ

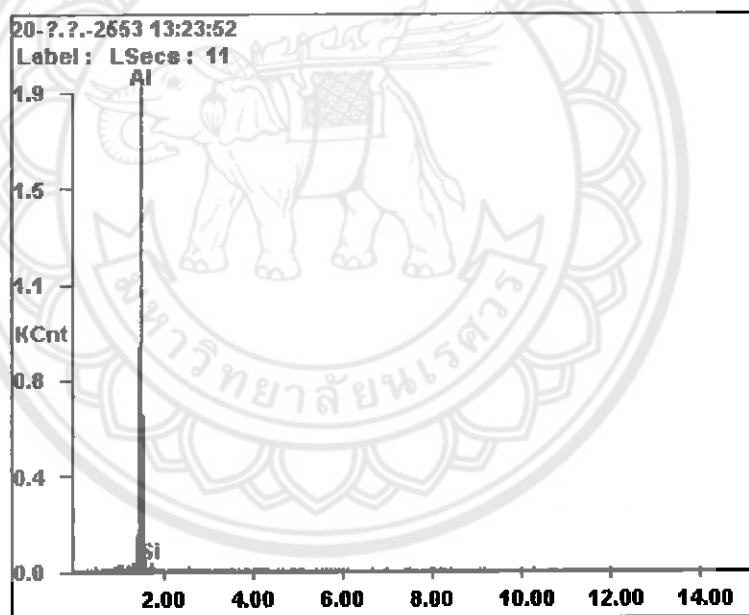
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเฟสซิลิคอนปฐมภูมิของชิ้นงานในสภาพหล่อ

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิลิคอน	97.65
อะลูมิเนียม	02.35

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) พบว่าเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม มีองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียม และซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยมีธาตุอะลูมิเนียมในปริมาณสูง เนื่องจากเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม มีธาตุหลัก คืออะลูมิเนียม และในเฟสนี้ผลึกของซิลิคอนบางส่วนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมจึงทำให้เห็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งอะลูมิเนียมและซิลิคอน แสดงดังตารางที่ 4.2



ก)



ข)

รูปที่ 4.3 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมในสภาพหล่อ

ก) ภาพ BEI ของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม ของชิ้นงานในสภาพหล่อ

ข) สเปกตรัมของธาตุเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม ของชิ้นงานในสภาพหล่อ

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมในสภาพหล่อ

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
อะลูมิเนียม	98.83
ซิลิคอน	01.17

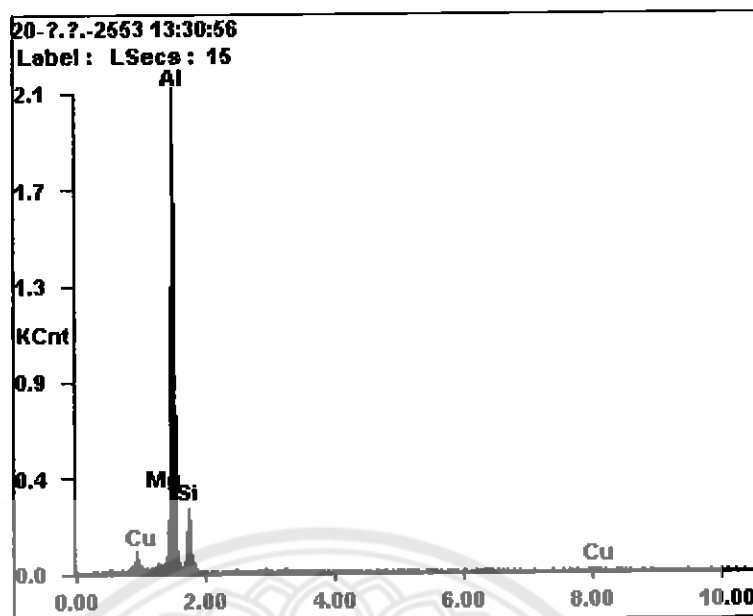
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาทำให้มองเห็นเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียม ซิลิคอน ทองแดง และแมกนีเซียม แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยมีธาตุอะลูมิเนียม และซิลิคอนในปริมาณสูง เนื่องจากเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกิดจากของแข็ง ที่สลับกันอยู่ระหว่างซิลิคอน และอะลูมิเนียม จึงทำให้มีธาตุทองแดง และแมกนีเซียมบางส่วนละลายอยู่ในเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนจึงทำให้เห็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งอะลูมิเนียม ซิลิคอน ทองแดง และแมกนีเซียม แสดงดังตารางที่ 4.3



ก)

รูปที่ 4.4 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในสภาพหล่อ

ก) ภาพ BEI ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานในสภาพหล่อ



ข)

รูปที่ 4.4 (ต่อ) การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในสภาพหล่อ

ข) สเปกตรัมของธาตุเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานในสภาพหล่อ

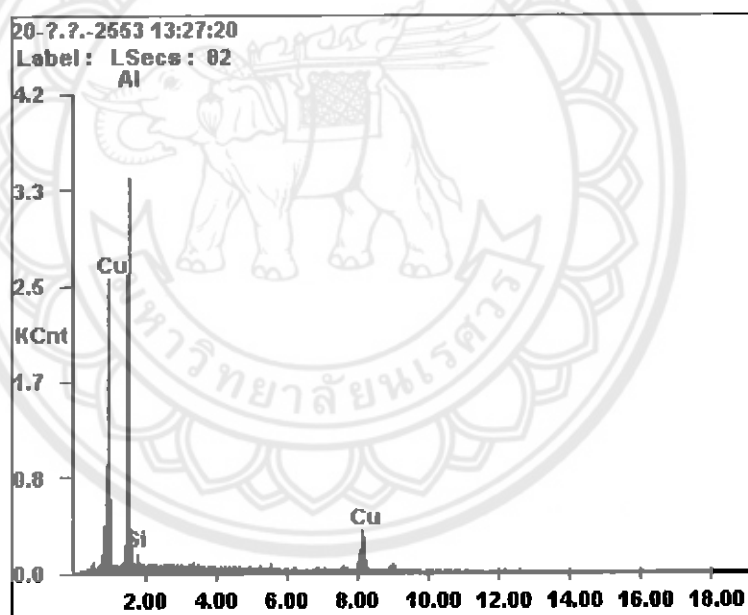
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานในสภาพหล่อ

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
อะลูมิเนียม	71.08
ซิลิคอน	24.20
ทองแดง	03.23
แมกนีเซียม	01.48

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียม ทองแดง และซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่ามีธาตุอะลูมิเนียม และทองแดงในปริมาณสูง เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC เหมือนกับอะลูมิเนียมจึงสามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม และธาตุซิลิคอนละลายอยู่น้อยมากจึงทำให้เห็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งอะลูมิเนียม ทองแดง และซิลิคอน แสดงดังตารางที่ 4.4



ก)



ข)

รูปที่ 4.5 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณของธาตุอะลูมิเนียม ทองแดง และซิลิคอน ชิ้นงานในสภาพหล่อ

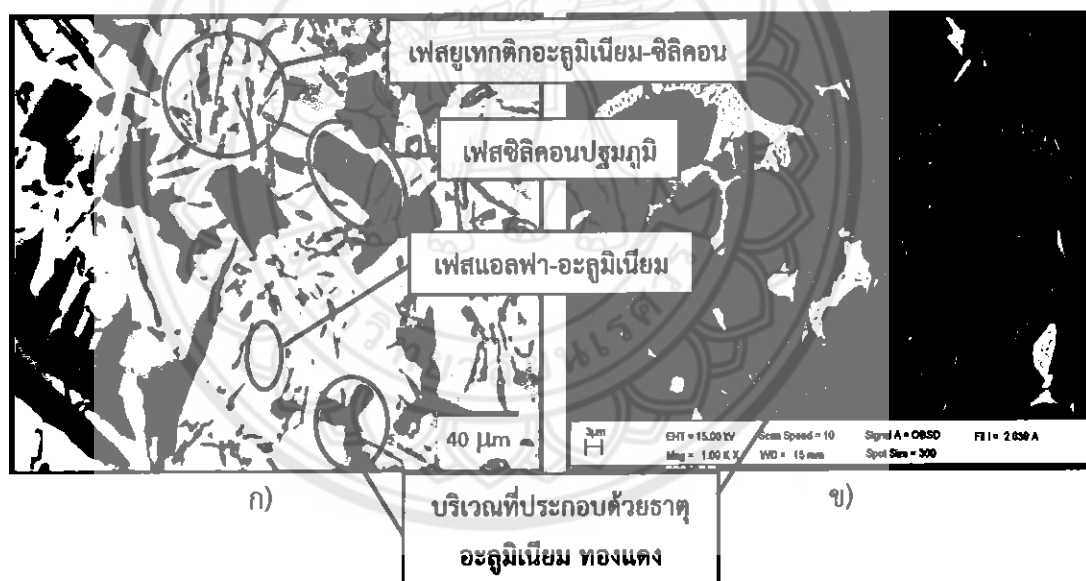
ก) ภาพ BEI ของธาตุอะลูมิเนียม ทองแดง และซิลิคอน ของชิ้นงานในสภาพหล่อ

ข) สเปกตรัมของธาตุของอะลูมิเนียม ทองแดง และซิลิคอน ของชิ้นงานในสภาพหล่อ

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของอะลูมิเนียม ทองแดง และซิลิคอน ของชิ้นงาน
ในสภาพหล่อ

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
อะลูมิเนียม	65.59
ทองแดง	32.03
ซิลิคอน	02.38

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบเฟสดังนี้ เฟสซิลิคอนปฐมภูมิ เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม เฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และบริเวณที่เป็นสีเทาอ่อนพบว่าประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียม ทองแดงเป็นหลัก และซิลิคอนเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.6 ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

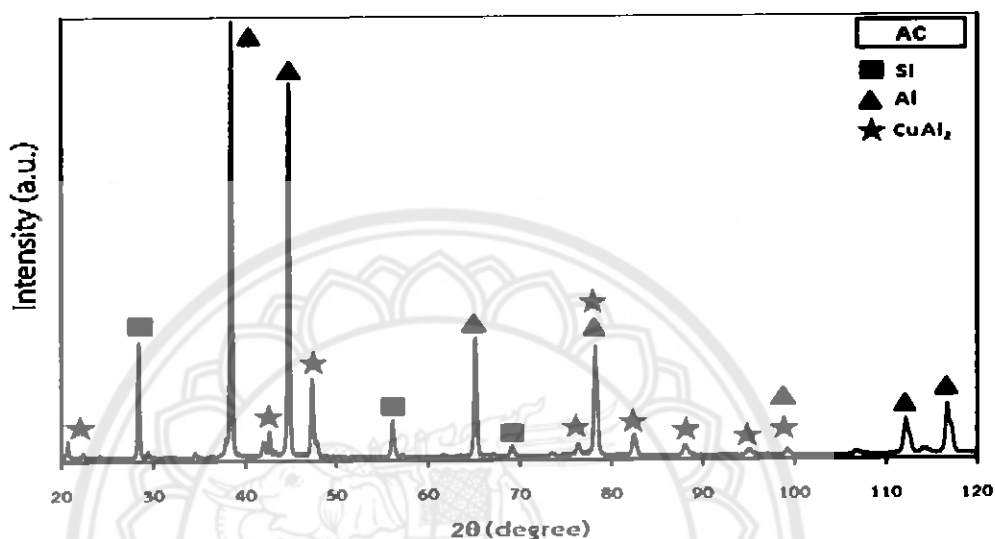


รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ

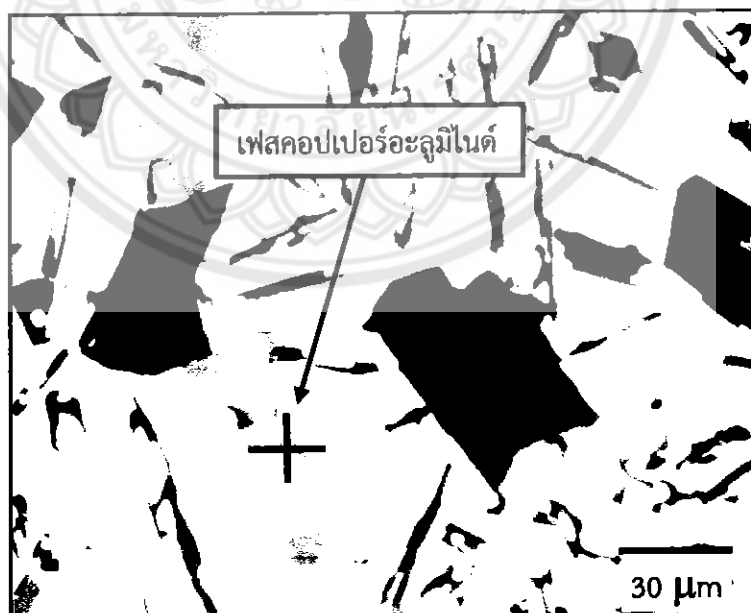
- ก) โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
- ข) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานในสภาพหล่อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.3 การศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบ

การศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของชิ้นงานในสภาพหล่อ พบว่าชิ้นงานประกอบด้วยเฟสซิลิคอน อะลูมิเนียม และเฟสคอปเปอร์อะลูไมด์ (CuAl_2) แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะสังเกตเห็นเฟสคอปเปอร์อะลูไมด์เป็นสีเทาอ่อน แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานในสภาพหล่อ



รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานในสภาพหล่อ

4.1.4.1 ผลการทดสอบความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ในสภาพหล่อ ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) ในการวัดค่าความแข็งจะนำชิ้นงานแต่ละชิ้น มาวัดความแข็งแบบสุ่มจำนวน 10 จุด โดยใช้หัวกดลูกบอล น้ำหนักกด 62.5 กิโลกรัม ใช้เวลากด 15 วินาทีต่อจุด พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 131.760 HB และมีค่าส่วนเบี่ยงมาตรฐานเท่ากับ 3.444 ดังตารางที่ ค.1

4.1.4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรง

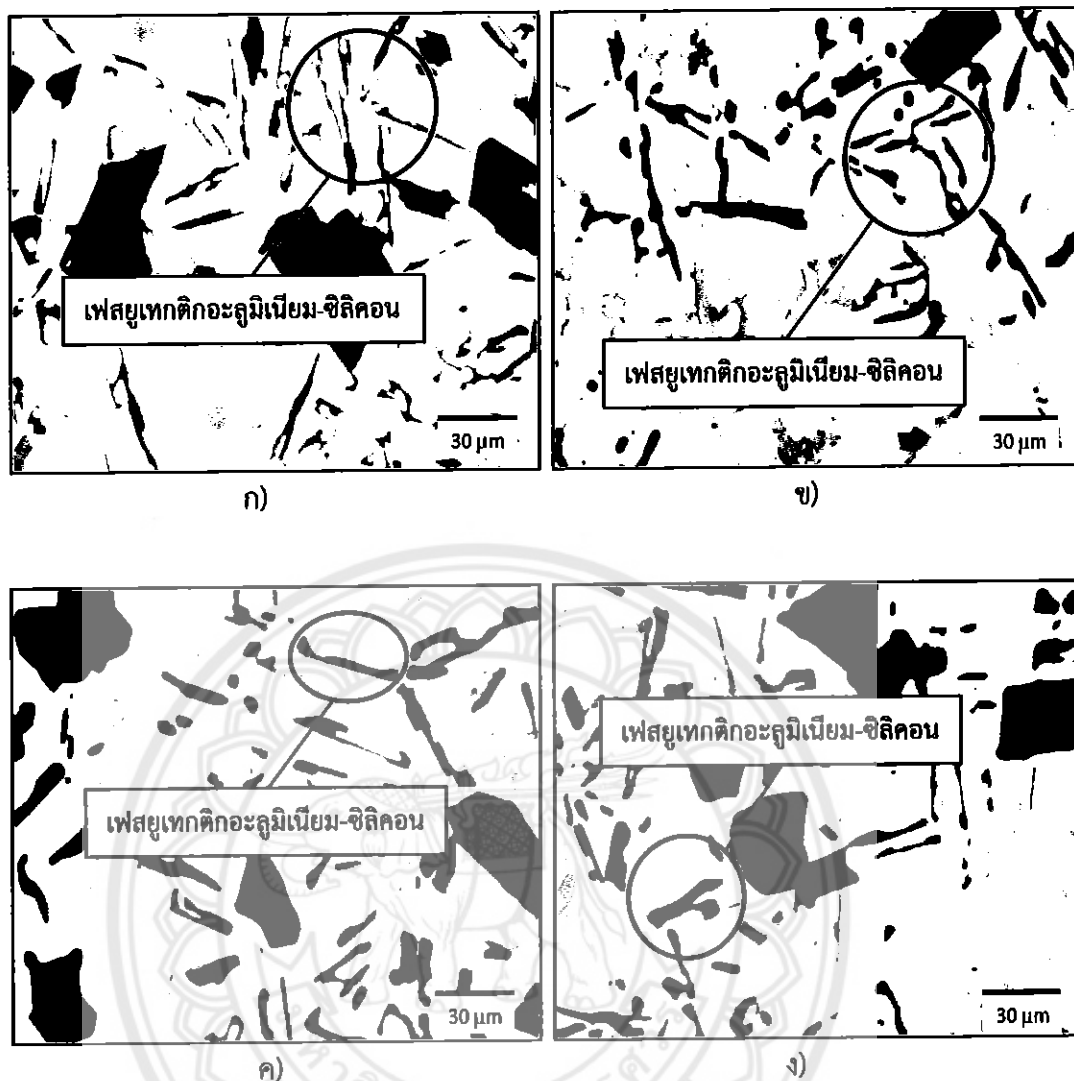
ผลการศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A390 ในสภาพหล่อ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การวัดค่าความแข็งแรงจะนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM B557 พบว่ามีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 95.817 MPa ดังตารางที่ ค.2

4.2 ผลการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390 หลังผ่านการอบละลาย

เมื่อนำชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นนำไปชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ และหลังผ่านการอบละลาย แสดงดังรูปที่ 4.9 ก) - จ) ในขั้นตอนการอบละลายส่งผลให้มีการแพร่ของอะตอมซิลิคอนออกจากเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และละลายเข้าไปในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม (King, 1987) เมื่อพิจารณาพร้อมกับเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน บอกได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มขึ้นทำให้อะตอมของซิลิคอนสามารถละลายเข้าไปในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปร่างและลักษณะของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยชิ้นงานในสภาพหล่อ เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีรูปร่างเป็นแท่งยาว ปลายแหลม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ก) เมื่อชิ้นงานผ่านขั้นตอนการอบละลาย พบว่ารูปร่างของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม เปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นกลมมนขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.9 ข) - จ) และการนับร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่ามีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ร้อยละ 38.597 โดยพื้นที่ของชิ้นงานหลังการอบละลาย ดังตารางที่ ข.5



รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาพหล่อ และหลังผ่านการอบละลาย ชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ก) ชิ้นงานในสภาพหล่อ

ข) ชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ค) ชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ง) ชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

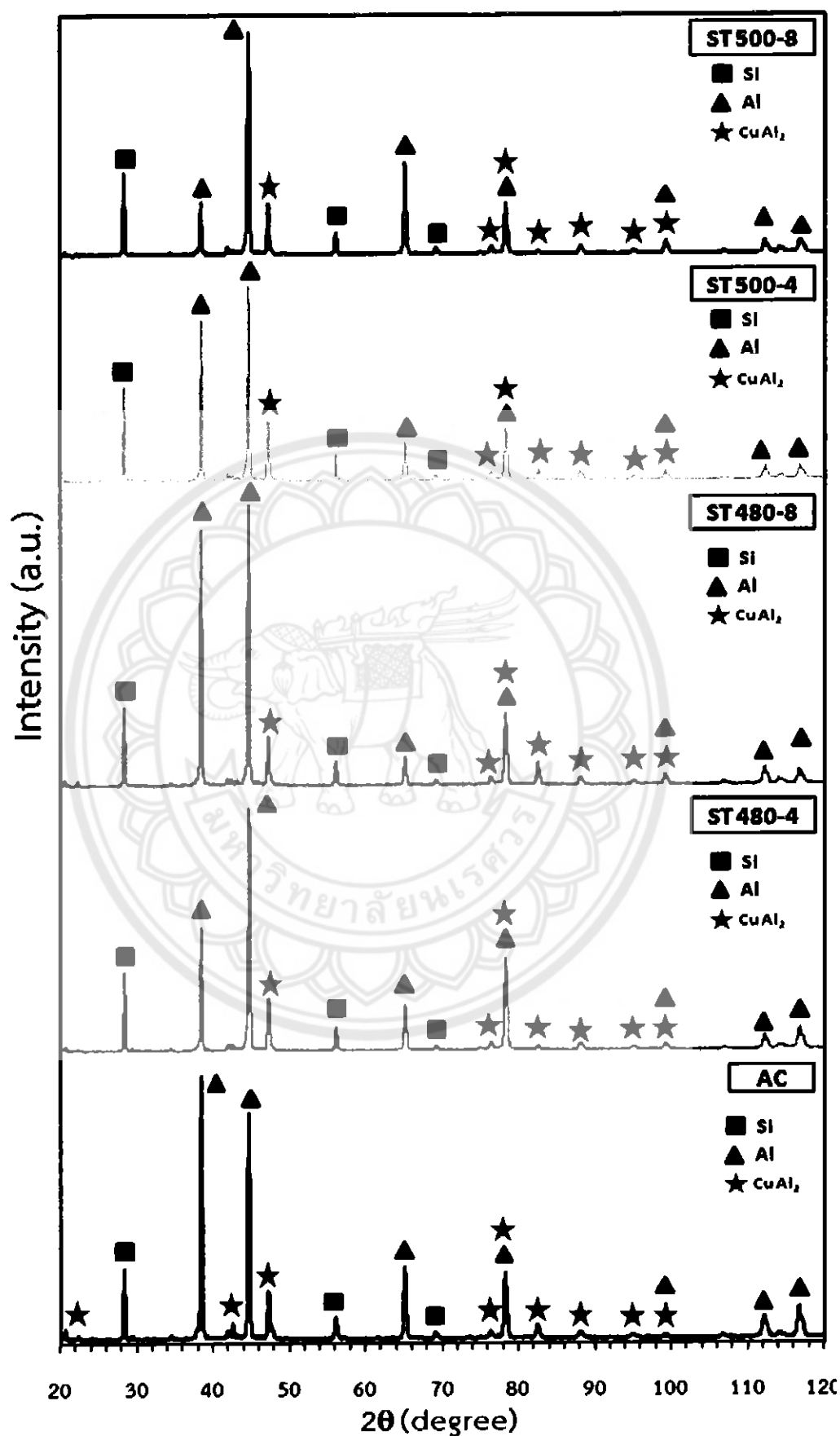


จ)

รูปที่ 4.9 (ต่อ) โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาพหล่อ และหลังผ่านการอบละลาย ชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
 จ) ชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบ

จากการศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าเฟสซิลิกอนก็ยังปรากฏขึ้นเช่นเดียวกับชิ้นงานในสภาพหล่อ รวมถึงเฟสอะลูมิเนียม และเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ก็เช่นเดียวกัน แต่ผลจากการอบละลายทำให้ฟีดของเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์หายไปบางฟีด เนื่องจากขั้นตอนการอบละลายทำให้เฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์บางส่วนละลายเข้าไปในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม (มโนส, 2541) เมื่อทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบลงในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ที่เกินจุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้องจึงถูกกักอยู่ในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และไม่มีโอกาสเคลื่อนที่แยกตัวออกจากเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมเป็นเฟสใหม่ แสดงดังรูปที่ 4.10

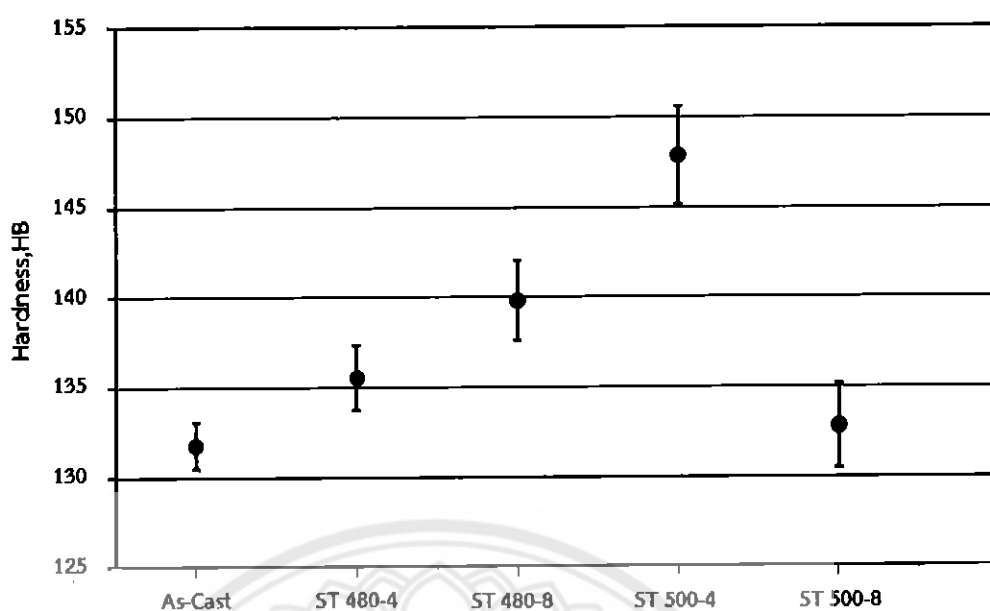


รูปที่ 4.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานหลังการอบละลาย

4.2.3 การศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย

4.2.3.1 ผลการทดสอบความแข็ง

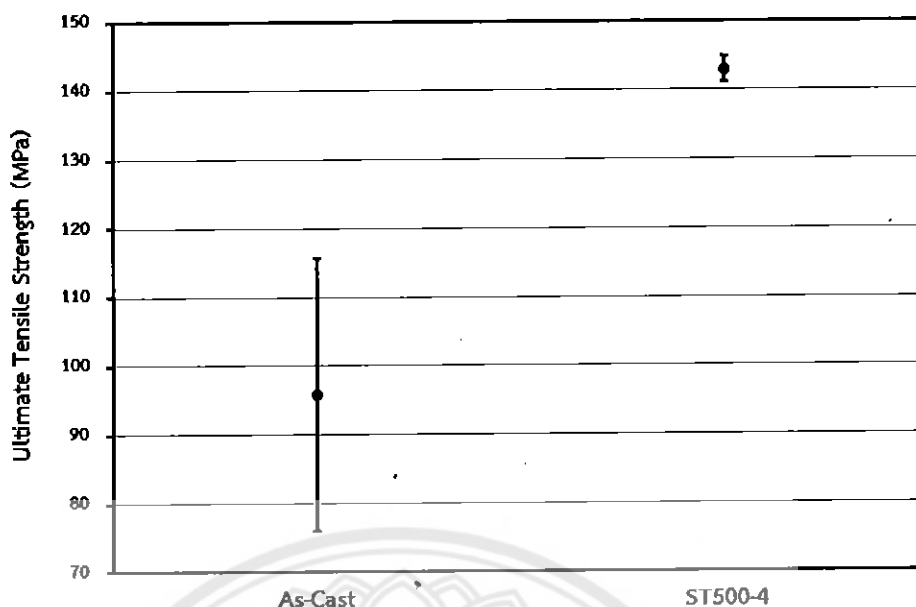
จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานในสภาพหล่อมีค่าเท่ากับ 131.76 HB และหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 135.552 HB และ 139.826 HB ตามลำดับ และชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 147.854 HB และ 132.804 HB ตามลำดับ ดังตารางที่ ค.ง และแสดงดังรูปที่ 4.11 จากผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายพบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 147.854 HB เมื่อเปรียบเทียบความแข็งระหว่างชิ้นงานในสภาพหล่อกับชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายทำให้ทราบว่าความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายจะทำให้ธาตุซิลิคอนแพร่ออกจากเฟสยูเทกติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอนละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกับเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม จึงทำให้รูปร่างเฟสยูเทกติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเดิมที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม เปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นกลมมนขึ้น และเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียมในบางส่วนก็ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกับเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมเช่นเดียวกัน จากนั้นก็ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวโดยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเย็นตัวที่เกิดขึ้นทำให้อะตอมของธาตุซิลิคอน และคอปเปอร์อะลูมิเนียมในดัดที่เกินจุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้องจึงถูกกักอยู่ในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ออกจากเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมเพื่อเกิดเฟสใหม่ได้อีก อะตอมของซิลิคอน และคอปเปอร์อะลูมิเนียมในดัดถือเป็นสิ่งแปลกปลอมเมื่ออยู่ในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมทำให้การเรียงตัวของอะตอมอะลูมิเนียมบิดเบี้ยวไปจากที่ควรจะเป็นก่อให้เกิดความเครียดขึ้น และส่งผลให้ชิ้นงานมีแรงต้านทานต่อแรงทางกลที่มากกระทำได้มากขึ้น และในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงมีค่าความแข็งลดลง เนื่องจากอะตอมของซิลิคอน และคอปเปอร์อะลูมิเนียมในดัดละลายเข้าไปในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมได้น้อยที่สุด จึงทำให้มีปริมาณเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มากที่สุดในการอบละลาย แสดงดังตารางที่ ข.5 โดยชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิ และเวลาที่ส่งผลให้มีความแข็งของชิ้นงานสูงสุด จึงนำมาทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังผ่านการอบละลาย

4.2.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรง

จากการทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มาทดสอบความแข็งแรงเนื่องจากมีความแข็งสูงสุด พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานในสภาพหล้อมีค่าเท่ากับ 95.817 MPa หลังการอบละลายมีค่าเท่ากับ 142.980 MPa ดังตารางที่ ค.2 และแสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเหมือนกับค่าความแข็ง สาเหตุที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง



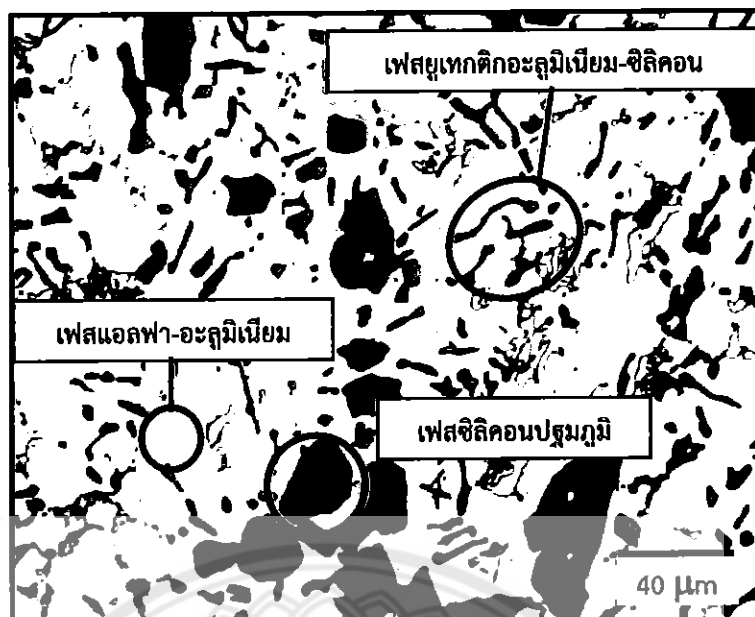
รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.3 ผลการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390 หลังผ่านการบ่มแข็ง

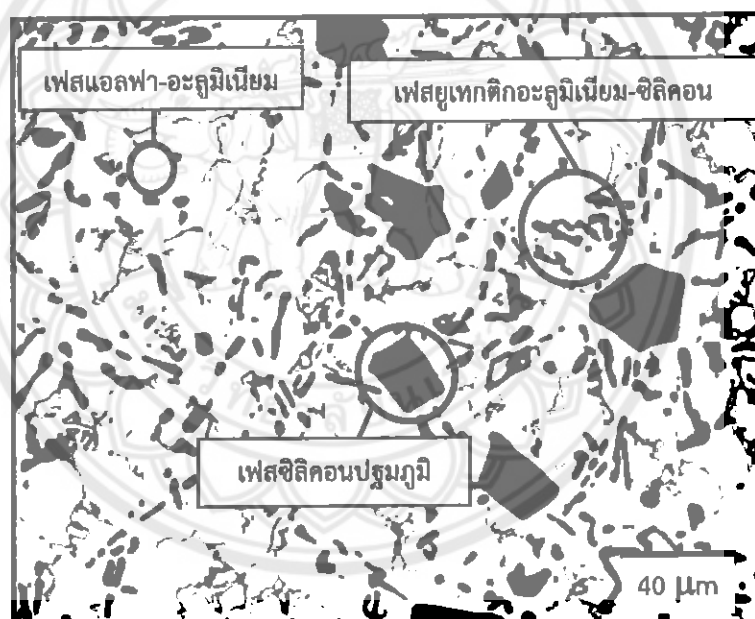
เมื่อนำชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มาทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390 เห็นได้ว่าทุกสภาวะมีโครงสร้างทางจุลภาคที่เหมือนกัน โดยระยะเวลาในขั้นตอนการบ่มแข็งจะไม่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการตกตะกอนของอนุภาคคอปเปอร์อะลูมิเนียมในที่เกิดการตกตะกอนขึ้นในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (Mitsuda et al., 2011) จึงไม่สามารถศึกษาได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของโครงสร้างทางจุลภาคหลังการอบละลายกับการบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.13 ก) - ข) และจากการนับร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนพบว่าปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนร้อยละ 37.483 โดยพื้นที่ของชิ้นงานบ่มแข็ง ดังตารางที่ ข.5



ก)



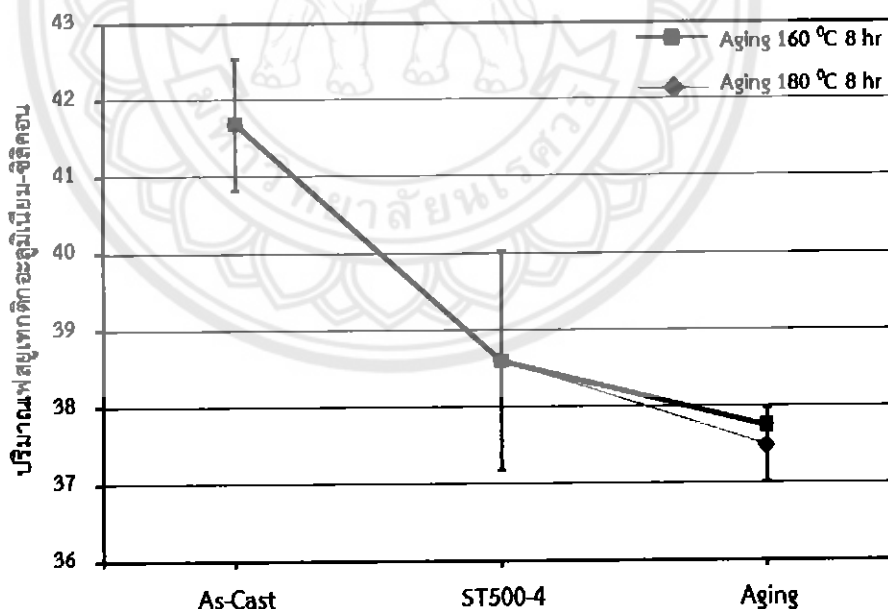
ข)

รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหลังการบ่มแข็ง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ก) ชิ้นงานหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ข) ชิ้นงานหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

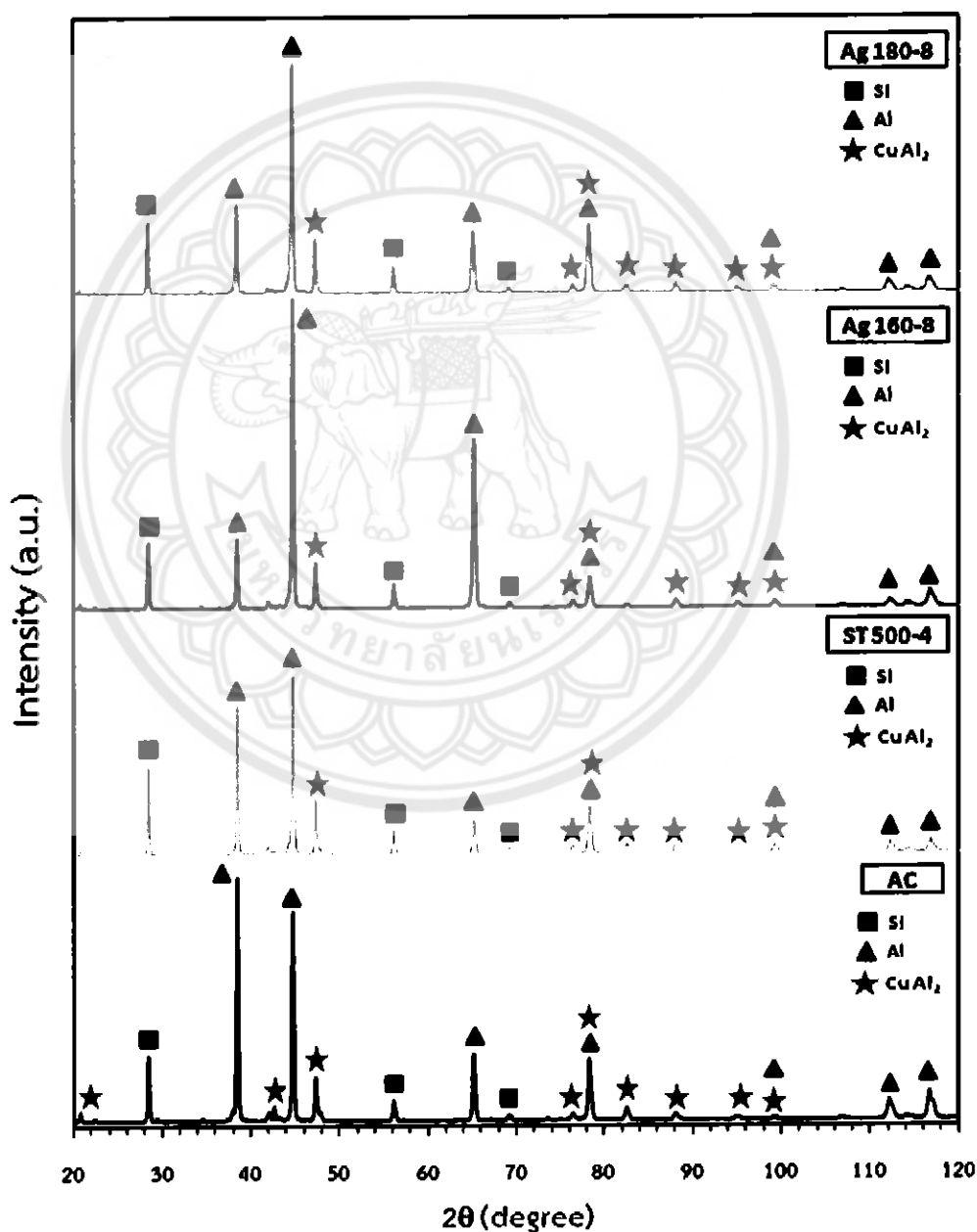
รูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนของชิ้นงานในสภาพหล่อมีร้อยละ 41.684 โดยพื้นที่ของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนร้อยละ 38.597 และชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนร้อยละ 37.746 และ 37.483 โดยพื้นที่ของชิ้นงานบ่มแข็ง ตามลำดับ ดังตารางที่ ข.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนพบว่าชิ้นงานในสภาพหล่อมีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนสูงกว่าชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากชิ้นงานในสภาพหล่อเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน มีรูปร่างเป็นแท่งยาวปลายแหลม ชิ้นงานหลังผ่านขั้นตอนการอบละลาย พบว่าเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม เปลี่ยนไปมีลักษณะเป็นกลมมนมากขึ้น เนื่องจากการอบละลาย และการบ่มแข็งทำให้อะตอมของซิลิกอนละลายเข้าสู่เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม จึงทำให้พบเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนในปริมาณน้อยลง เมื่อทำการนับร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน พบว่าปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนลดลง และปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหลังการอบละลาย และการบ่มแข็งมีข้อมูลอยู่ในกลุ่มเดียวกันแต่หลังการบ่มแข็งค่าเฉลี่ยปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนต่ำกว่าการอบละลาย แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ปริมาณของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

4.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบ

จากผลของการศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่ามีเฟสซิลิกอน อะลูมิเนียม และเฟสคอปเปอร์-อะลูมิเนียม เหมือนกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย เนื่องจากกรรมวิธีทางความร้อนมีอุณหภูมิที่ต่ำ จึงไม่มีการเกิดเฟสใหม่ขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.15

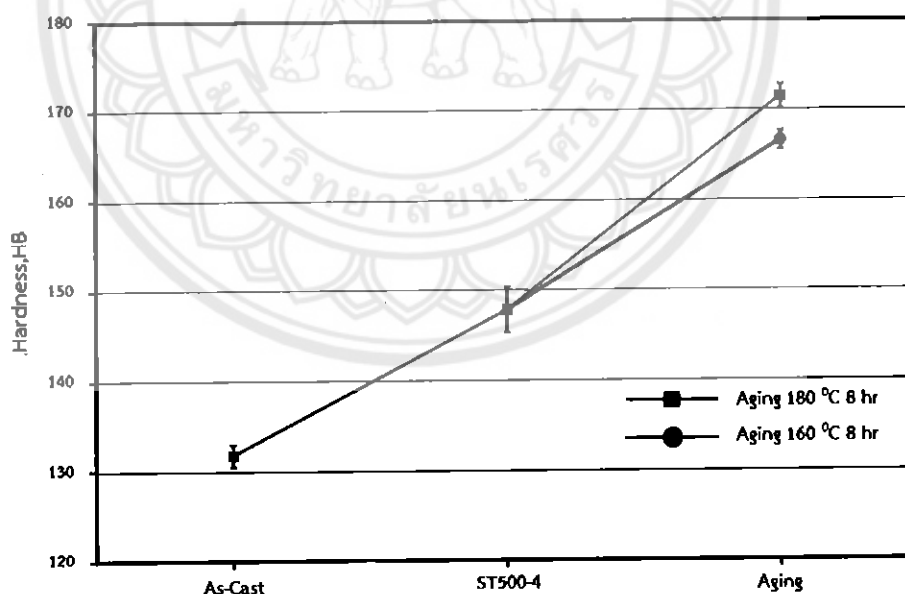


รูปที่ 4.15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็ง

4.3.3 การศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็ง

4.3.3.1 ผลการทดสอบความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานในสภาพหล่อมีค่าเท่ากับ 131.76 HB และหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งเท่ากับ 147.85 HB จากนั้นนำมาผ่านการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่ามีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 166.593 HB และ 171.453 HB ตามลำดับ ดังตารางที่ ค.1 และแสดงดังรูปที่ 4.16 จากผลการทดสอบความแข็ง พบว่าชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าความแข็งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบความแข็งหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เนื่องจากการบ่มแข็งทำให้อนุภาคของคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ที่มีปริมาณเกินจุดอิ่มตัวแต่ละลายอยู่ในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมเย็นนั้นเกิดความไม่เสถียรพยายามก่อตัวเป็นเฟสใหม่ โดยอุณหภูมิ และเวลาการบ่มแข็งมีผลต่อการตกตะกอนของอนุภาคคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ จึงทำให้อนุภาคของคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ระดับนาโนเมตรตกตะกอนอยู่บนเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม (Mitsuda et al.,2011) ทำให้ชิ้นงานสามารถต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

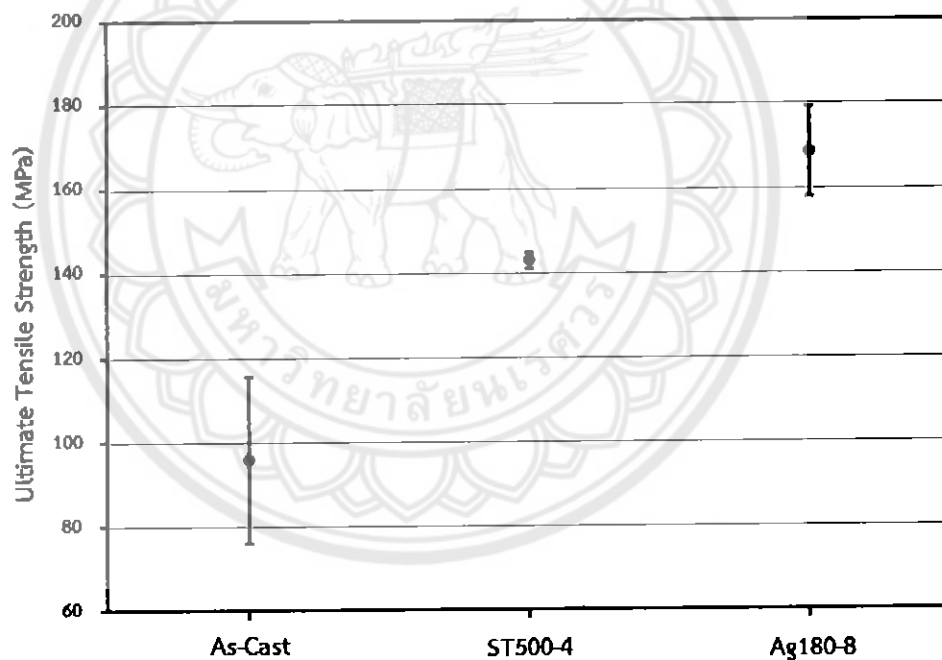


รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

4.3.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรง

จากผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่าการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าความแข็งแรงสูงสุด จึงเลือกชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนดังกล่าวมาทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานพบว่ามีค่าเท่ากับ 168.588 MPa ดังตารางที่ ค.2

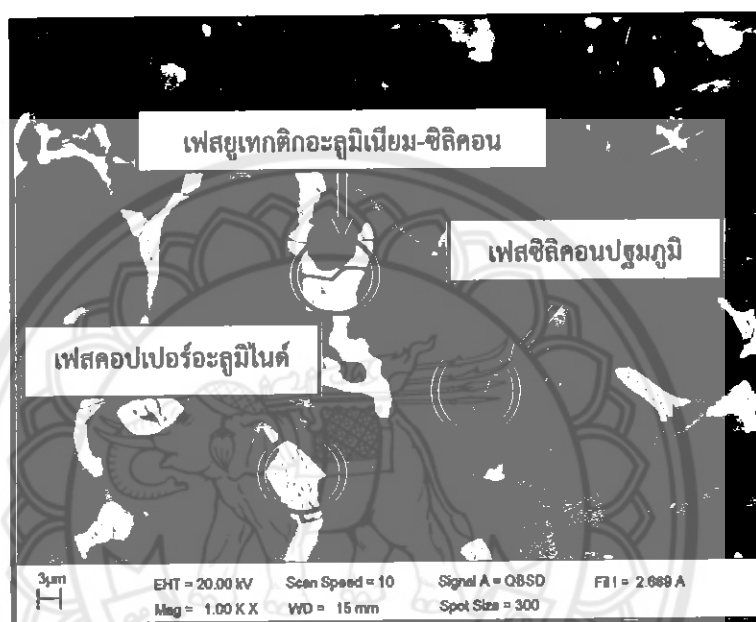
เมื่อนำค่าความแข็งแรงของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาเปรียบเทียบกับ พบว่าจากช่วงข้อมูลทำให้เห็นค่าความแข็งแรงแตกต่างกันอย่างชัดเจน ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานในสภาพหล่มีค่าต่ำสุด และค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานได้ผ่านขั้นตอนการอบละลาย และค่าความแข็งแรงมีค่าสูงสุด เมื่อชิ้นงานได้ผ่านขั้นตอนการบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าค่าแข็งแรงเพิ่มขึ้นเหมือนกับค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรง



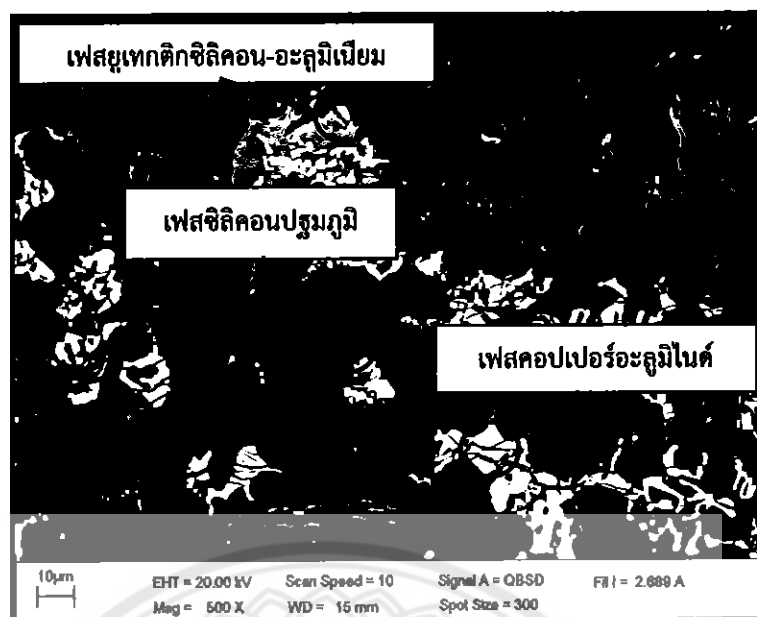
รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

4.3.4 การวิเคราะห์ตำแหน่งการแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง พบว่าเกิดการแตกบริเวณเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิ เฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 4.18-4.19 เนื่องจากเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิมี เฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีธาตุซิลิคอนผสมอยู่ด้วย และเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียมมีธาตุทองแดงผสมอยู่ จึงทำให้เฟสแบบนี้เปราะ และชิ้นงานแตกหักได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกระทำ



รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย BEI ของโครงสร้างทางจุลภาค และผล EDXS ของชิ้นงานในสภาพหล่อที่ผ่านการทดสอบแรงดึงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย BEI ของโครงสร้างทางจุลภาค และผล EDXS ของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ที่ผ่านการทดสอบแรงดึงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของโครงการ

5.1.1 ชิ้นงานในสภาพหล่อ โครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วยเฟสซิลิคอนปฐมภูมิ เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม (α -Al) เฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียม (CuAl_2) และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเป็นแท่งยาว ปลายแหลม มีค่าความแข็งเท่ากับ 131.760 HB และความแข็งแรงเท่ากับ 95.817 MPa และการนับร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่ามีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนร้อยละ 41.684 โดยพื้นที่ของชิ้นงานในสภาพหล่อ

5.1.2 ชิ้นงานหลังผ่านขั้นตอนการอบละลาย โครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วยเฟสซิลิคอนปฐมภูมิ เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม เฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียม และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเป็นแท่งยาว ปลายมีลักษณะเป็นกลมมนขึ้น และค่าความแข็งของการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 135.552 HB, 139.826 HB, 147.854 HB และ 132.804 HB ตามลำดับ และขั้นตอนการอบละลายพบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งสูงสุด และความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 147.854 MPa การนับร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่ามีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนร้อยละ 38.597 โดยพื้นที่ของชิ้นงานหลังการอบละลาย

5.1.3 ชิ้นงานหลังผ่านขั้นตอนการบ่มแข็ง พบว่าทุกสภาวะมีโครงสร้างทางจุลภาคที่เหมือนกันกับขั้นตอนการอบละลาย และการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่ามีค่าความแข็งเท่ากับ 166.593 HB และ 171.453 HB ตามลำดับ ซึ่งความแข็งหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าสูงสุด และความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 168.588 MPa และการนับร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่ามีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนร้อยละ 37.483 โดยพื้นที่ของชิ้นงานหลังบ่มแข็ง

5.1.4 จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทดสอบแรงดึงก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน พบว่าเกิดการแตกบริเวณเฟสซิลิคอนปฐมภูมิ เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และเฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียม

5.1.5 จากการศึกษา และเปรียบเทียบผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ ประกอบด้วยเฟสซิลิคอนปฐมภูมิ เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม เฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียม และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเป็นแท่งยาว ปลายแหลม แต่หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีลักษณะกลมมนขึ้น และปริมาณลดลง

5.1.6 จากการศึกษาค่าความแข็ง และความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน พบว่ามีค่าสูงขึ้นหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 การปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล สามารถเลือกชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบอื่นๆ มาศึกษา และเปรียบเทียบผลกรรมวิธีทางความร้อนได้

5.2.2 ขั้นตอนการบ่มแข็งสามารถศึกษาเพิ่มเติม เกี่ยวกับอุณหภูมิ และเวลาที่ทำให้ค่าความแข็ง และความแข็งแรงมีค่าสูงที่สุด

5.2.3 เมื่อนำชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อนมาเปรียบเทียบกัน พบว่าไม่สามารถวัดอนุภาคของคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ที่เกิดการตกตะกอนขึ้นหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เนื่องจากอนุภาคของคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ในเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม (α -Al) มีขนาดเล็กในระดับของนาโนเมตร ดังนั้นควรมีการศึกษาอนุภาคของคอปเปอร์อะลูมิเนียมไนต์ที่เกิดการตกตะกอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 การใช้เตาอบที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตา อาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานเกิดอันตรายได้ ฉะนั้นเราจึงควรใส่อุปกรณ์ที่ป้องกันความร้อนทุกครั้ง

5.3.2 การตัดชิ้นงาน ควรยึดชิ้นงานให้แน่น ก่อนทำการตัด เพราะถ้าชิ้นงานหลุด หรือขยับตัว จะทำให้ใบมีดตัดแตกหัก และอาจเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้

เอกสารอ้างอิง

- เซาวลิต ลิ้มเจริญจิต และวิทยา เอียดเหตุ. (2545). กลไกการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดโดยใช้โลหะแม่ของ โลหะอะลูมิเนียมผสม - ซิลิกอนเกรด 356 โดยใช้โลหะแม่. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เซาวลิต ลิ้มเจริญจิต.(2547-2548). โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรดไฮเปอร์ยูเทคติก. เทคโนโลยีอุตสาหกรรม.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. กรรมวิธีการผลิตโลหะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2553 ในอินเทอร์เน็ต เว็บไซต์ http://www.mme.rmuti.ac.th/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=3&id=2&Itemid=25
- ธนากรณ ตั้งวานิชพงษ์. (2547). โลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม - ซิลิกอน. วารสารหล่อโลหะ.
- ธนากรณ ไกรราชน, วิชาสินี วุฒิศรสถลและธีระพัฒน์ สมบัติวงศ์. (2543). เทคโนโลยี และโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมหล่อ.(พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
- บัญชา ธนบุญสมบัติ และศุภกาญจน์ คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประตูลู่โลหะระดับจุลภาค. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.
- พยุร เกตุกราย. (2523). การหล่อโลหะ ภาคการผลิต. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น).
- มนัส สติรจินดา. (2541). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. (พิมพ์ครั้งที่ 3). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รองศาสตราจารย์ แมน อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2544) วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม-ความแข็งแรงบริเนลล์สำหรับโลหะ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพมหานคร 10400.
- วิรุณ บัวงาม. เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี สืบค้นในอินเทอร์เน็ตเว็บไซต์ <http://learners.in.th/blog/wirut/325228>
- อุมารินทร์ พงโสพิทานันท์. (2548). กลไกทางโลหะวิทยาต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างยูเทคติกในงานหล่ออะลูมิเนียมผสมซิลิกอน. วารสารหล่อโลหะ. ฉบับที่ 3.
- Aluminum and aluminum alloys, ASM Specialty Handbook, ASM international, Chagrin Falls, Ohio, 2002, 290-719.
- ASTM B 557 Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum-and Magnesium-Alloy Products.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

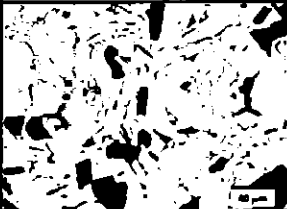
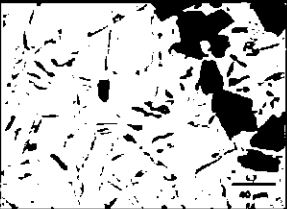
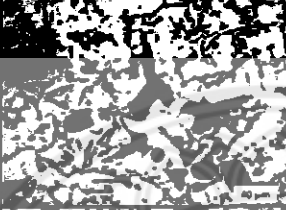
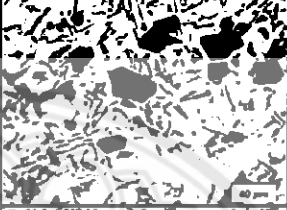
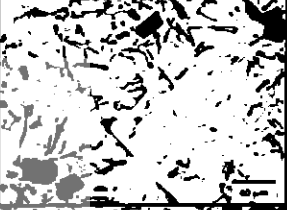
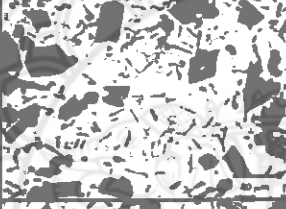
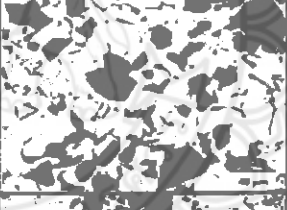
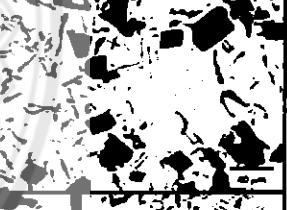
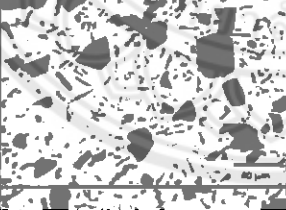
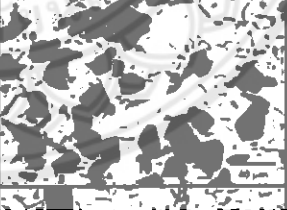
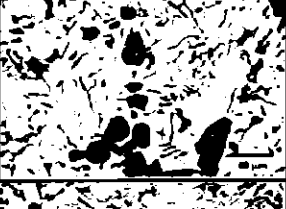
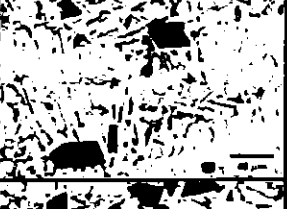
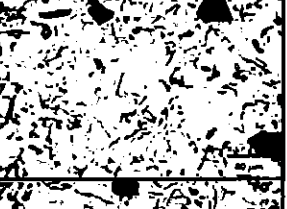
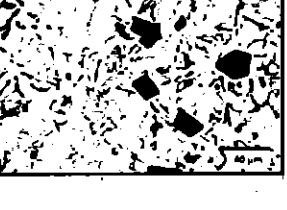
- F. Abd El-Salam, A.M. El-Khalek, R.H. Nada, L.A. Wahab and H.Y. Zaha. (2010). Effect of Sn content on structural and mechanical properties of Al-Si alloy. Materials Science and Engineering A527.
- F. King. (1987). *Aluminum and its alloy*. England: Ellis horwood limited.
- G. Ran, J. Zhou, and Q. G. Wang. (2006). The effect of Hot Isostatic Pressing on the Microstructure and Tensile Properties of an Unmodified A356-T6 Cast Aluminum Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*.
- I. J. Polmear. (1989). *Light alloys metallurgy of the light metals*. London: E. Arnold.
- J. Buha. (2005). Interrupted aging of Al-Mg-Si-Cu alloy. Material science and engineering, Faculty of science, New South Wales University.
- J. Buha, R. N. Lumley, A.G. Crosky and K. Hono. (2007). Secondary precipitation in an Al-Mg-Si-Cu alloy. *Acta Materialia*.
- J. Pearce. (2002). Heat treatment of aluminium alloys. *Metal Casting Technologies*.
- J. Pearce. (2548). การอบชุบสำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อ. วารสารหล่อโลหะ.
- Kori S.A, Murty B.s and Chakraborty M. (2000). Development of an Efficient Grain Refiner for Al-7Si Alloy and Its Modification with Strontium. *Materials Science and Engineering*.
- Laws of Science. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2553 ในอินเทอร์เน็ตเว็บไซต์ http://orionift.tripod.com/physics_phunnies.htm
- M. Gupta and E.J. Lavernia. (1995). Effect of processing on the microstructural variation and Heat-treatment response of a hypereutectic Al-Si alloy. *Materials Processing Technology*.
- R. Cornell and H. K. D. H. Bhadeshia. (1999). *Aluminium-Silicon Casting Alloys*.
- R. Askeland. (1994). Dispersion strengthening by phase transformation and heat treatment. *science and engineering of material*.
- T. Mitsuda, I. Kobayashi, NaO. Fujita, Y. Saitoh, F. Hori, S. Semborshi, Y. Kaneno, K. Nishida, N. Soneda and A. Iwase. (2011). Hardening of Al-Cu-Mg Alloy by energetic Inon irradiation. *Journal of Nuclear Materials*.
- Yucel Birol. (2008). Cooling slope casting and thixoforming of hypereutectic A390 alloy. *Journal of Materials Processing Technology*.

ภาคผนวก ก

โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน
ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



ตารางที่ ก.1 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ณ บริเวณต่างๆ

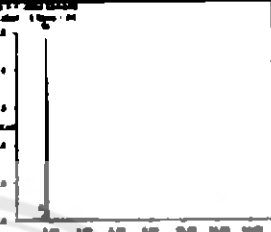
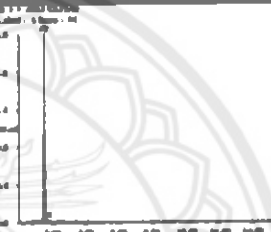
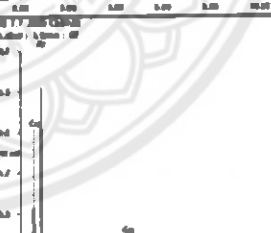
บริเวณ สถานะ	กลาง	ขอบใน	ขอบนอก
As-Cast			
ST 480-4			
ST 500-4			
ST 480-8			
ST 500-8			
Ag 160-8			
Ag 180-8			

ภาคผนวก ข

โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน
ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

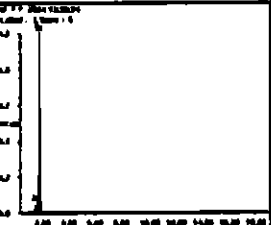
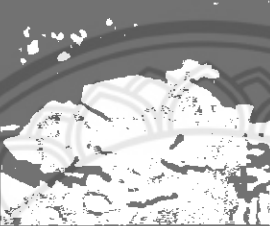
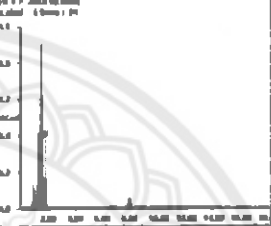
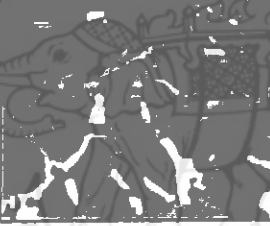
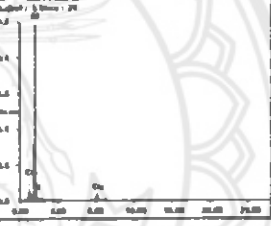
การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบริเวณเฟสต่างๆ ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390 ก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบริเวณเฟสต่างๆ ของชิ้นงานก่อน และหลัง กรรมวิธีทางความร้อน

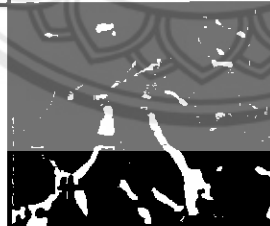
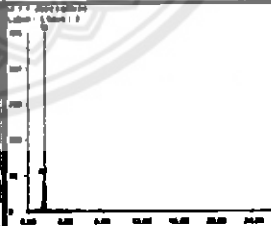
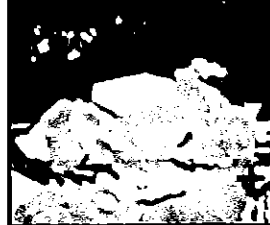
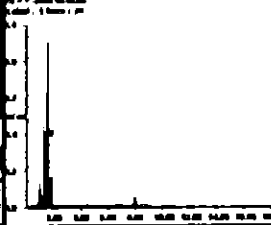
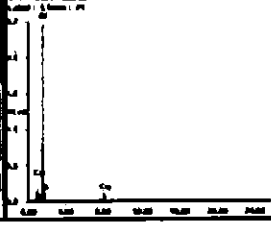
เลขของชิ้นงาน	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ	
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เฟสซิลิกอนปฐมภูมิ			ซิลิกอน	97.65
			อะลูมิเนียม	2.35
เฟสอะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม (Al-Al)			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	98.83
			ซิลิกอน	1.17
เฟสยูทาคาไลอะลูมิเนียม-ซิลิกอน			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	71.08
			ซิลิกอน	24.2
			ทองแดง	3.23
			แมกนีเซียม	1.48
เฟสคอปเปอร์อะลูมิเนียม			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	65.59
			ทองแดง	32.03
			ซิลิกอน	2.38

การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบริเวณเฟสที่เกิดการแตกหัก ชิ้นงานทดสอบแรงดึงก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

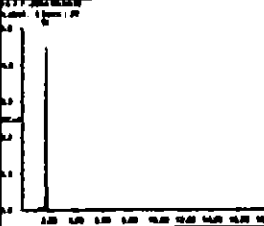
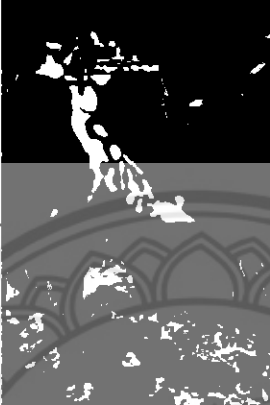
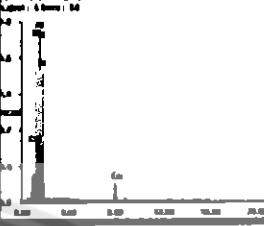
ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานทดสอบแรงดึงในสภาพหล่อ

เฟสของชิ้นงานในสภาพหล่อ	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ	
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เฟสซิลิคอนปฐมภูมิ			ซิลิคอน	95.71
			อะลูมิเนียม	4.29
เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si)			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	44.32
			ซิลิคอน	23.16
			แมกนีเซียม	18.27
เฟสคอนไปร้ออะลูมิเนียม			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	73.04
			ทองแดง	20.88
			ซิลิคอน	6.09

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังผ่านการอบละลาย

เฟสของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลาย	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ	
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เฟสซิลิคอนปฐมภูมิ			ซิลิคอน	88.2
			อะลูมิเนียม	11.8
เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si)			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	44.32
			ซิลิคอน	23.16
			แมกนีเซียม	18.27
เฟสคอนไปร้ออะลูมิเนียม			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	73.04
			ทองแดง	20.88
			ซิลิคอน	6.09

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังผ่านการบ่มแข็ง

เลขของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็ง	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ	
			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เหล็กซิลิคอนเปอร์มังกานีส			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			ซิลิคอน	98.02
			อะลูมิเนียม	1.98
เหล็กกล้าอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic: Al-Si)			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	44.32
			ซิลิคอน	23.16
			แมงกานีส	18.27
			ทองแดง	14.24
เหล็กอะลูมิเนียมอะลูมิเนียม			ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
			อะลูมิเนียม	49.88
			ทองแดง	49.11
			ซิลิคอน	1.00

ปริมาณเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

ตารางที่ ข.5 ปริมาณเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

ชิ้นงานในสภาวะต่างๆ จำนวนรูปชิ้นงาน	AC	ST480-4	ST480-8	ST500-4	ST500-8	Ag160-8	Ag180-8
1	45.517	36.4896	38.7056	39.040	41.812	40.112	37.845
2	41.898	41.6965	39.8978	35.899	36.596	37.507	33.236
3	38.750	34.7411	37.8022	40.696	40.835	36.393	36.076
4	46.889	40.7055	40.308	35.334	37.440	36.665	38.245
5	38.573	35.759	35.2402	39.826	40.187	39.074	38.792
6	41.390	45.8667	40.8842	33.885	39.729	36.514	34.586
7	39.925	42.4444	35.5812	30.928	41.365	36.574	38.364
8	42.557	36.9204	39.9424	44.089	40.162	39.115	37.793
9	40.945	38.8908	40.1936	44.708	38.990	36.098	40.022
10	40.399	38.994	39.5712	41.564	42.304	39.410	39.877
ค่าเฉลี่ย	41.684	39.251	38.813	38.597	39.942	37.746	37.483
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.713	3.462	1.992	4.489	1.838	1.515	2.208
ค่าความคลาดเคลื่อน	0.858	1.095	0.630	1.420	0.581	0.479	0.698

ภาคผนวก ค
สมบัติทางกลของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน



สมบัติทางกลของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

จำนวนชิ้นงาน ชิ้นงานในสถานะต่างๆ	1	2	3	4	5	6	7	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
As-Cast	132.624	132.624	132.624	128.408	126.373	132.624	137.045	131.760	3.444	1.302
ST 480-4	141.685	137.045	137.045	137.045	132.624	126.373	137.045	135.552	4.820	1.822
ST 480-8	132.624	137.045	132.624	146.560	141.685	141.685	146.560	139.826	5.903	2.231
ST 500-4	151.684	144.092	141.685	157.075	157.075	141.685	141.685	147.854	7.223	2.730
ST 500-8	128.408	128.408	141.685	141.685	132.624	128.408	128.408	132.804	6.260	2.366
Ag 160-8	162.752	162.752	168.736	168.736	165.704	168.736	168.736	166.593	2.637	0.997
Ag 180-8	171.849	175.049	165.704	175.049	168.736	168.736	175.049	171.453	3.521	1.331

ตารางที่ ค.2 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

จำนวนชิ้นงาน ชิ้นงานในสถานะต่างๆ	1	2	ค่าความแข็งแรง (MPa)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
As-Cast	75.948	115.686	95.817	28.099	19.869
ST 500-4	144.810	141.150	142.980	2.588	1.830
Ag 180-8	157.909	179.268	168.588	15.103	10.680

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวอภิญญา เวชการ
ภูมิลำเนา 163 หมู่ 2 ตำบลยาง อำเภอน้ำยืน
จังหวัดอุบลราชธานี 34260

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพระสุธรรมยานเถระวิทยา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: apinya_n@windowslive.com



ชื่อ นายอภิชาติ ชื่อนาม
ภูมิลำเนา 61 หมู่ 6 ตำบลตาดคว้น อำเภอพญาเม็งราย
จังหวัดเชียงราย 57290

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนแม่ตำบวิทยา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: apichat_win@hotmail.co.th