



การศึกษากรรมวิธีทางความร้อน T6 ที่มีผลต่อสมบัติด้านความแข็งของโลหะ
ผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ผ่านการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง
A STUDY OF T6 HEAT TREATMENT PROCESS ON HARDNESS
PROPERTY OF A319 ALUMINUM-SILICON ALLOYS PRODUCED
BY HIGH PRESSURE DIE CASTING

นายประกาศิต สุธงสุริยะ รหัส 52363356
นายปราชนธ์ตระกูล เผื่อเม่น รหัส 52363363
นายปาฎิหารีย์ แต่งใจ รหัส 52363387

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ.....1.๑๑.๒๕๕๖.....
เลขทะเบียน.....163๒๒๙1.....
เลขเรียกหนังสือ.....ฟร.....
มหาวิทยาลัยรัตนนคร ๒๕๕๖

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร
ปีการศึกษา ๒๕๕๕



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษากรรมวิธีทางความร้อน T6 ที่มีผลต่อสมบัติด้านความแข็งของ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ผ่านการหล่อฉีดด้วยแรงดัน สูง

ผู้ดำเนินโครงการ นายประกาศิต สุทธสุริยะ รหัส 52363356
นายปราชญ์ตระกูล เผื่อเม่น รหัส 52363363
นายปาฎิหารีย์ แต่งใจ รหัส 52363387


ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์

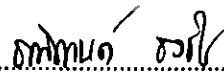
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

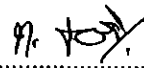
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ


ปีการศึกษา 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ธนิษานต์ ธงชัย)


.....กรรมการ
(อาจารย์ทศพล ตีร์จุริราภาพงศ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษากรรมวิธีทางความร้อน T6 ที่มีผลต่อสมบัติด้านความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ผ่านการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายประกาศิต	สุทธสุริยะ รหัส 52363356
	นายปราชญ์ตระกูล	เผื่อเม่น รหัส 52363363
	นายปาฎิหารีย์	แดงใจ รหัส 52363387
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กฤษณา	พูลสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2555	

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากรรมวิธีทางความร้อน T6 ที่มีผลต่อสมบัติด้านความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ผ่านการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง โดยชิ้นงานในสภาพหล่อนี้จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 134.28 HB จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีลักษณะชั้นๆ สีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ต่อมานำชิ้นงานทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 165.38 HB หลังจากศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่า เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่จากเดิมมีลักษณะชั้นๆ สีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เปลี่ยนเป็นลักษณะกลมมนมากขึ้น และเมื่อนำชิ้นงานมาบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคจะมีลักษณะเหมือนในขั้นตอนการอบละลาย แต่มีการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กของเฟสซิลิคอนในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิการบ่มแข็งที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีพลังงานที่กระตุ้นมากพอที่จะเกิดเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีการกระจายตัวมากขึ้น และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนค่อยๆรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ และทำให้มีลักษณะเป็นทรงกลม ในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 171.96 HB

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ ข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ตลอดจนแนะนำวิธีการในการ แก้ไขปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมาจนสามารถทำงานลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ และ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่ เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง นักวิทยาศาสตร์อสิริย์ วัฒนภาพ และคุณปัทมา อภิชัย ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำ โครงการ อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆให้ถูกต้องอีกด้วย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถ เรียน และทำโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำ โครงการนี้จนลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ผู้ดำเนินโครงการ

ประกาศิต สุธสุริยะ
ปราชนวัตรกุล เผื่อนเม่น
ปาฏิหาริย์ แต่งใจ

มีนาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม.....	4
2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน.....	4
2.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319.....	8
2.4 การเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมหล่อโดยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening).....	9
2.5 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope).....	15
2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	21
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ.....	21
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์.....	22
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	30
4.1 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ในสภาพหล่อ.....	30
4.2 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 หลังผ่านการอบละลาย.....	31
4.3 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 หลังผ่านการบ่มแข็ง.....	33
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 บทสรุปของโครงการ.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	40
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก ก.....	44
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	58
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ.....	9
3.1 ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 (ร้อยละโดยน้ำหนัก).....	22
ก.1 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะงานหล่อ และสภาวะหลังการอบที่อุณหภูมิที่ 495 องศาเซลเซียส.....	45
ก.2 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง.....	46
ก.3 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง.....	47
ก.4 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง.....	48
ก.5 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง.....	49
ข.1 ปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน (ร้อยละโดยพื้นที่).....	51
ข.2 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะงานหล่อ และสภาวะหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส.....	53
ข.3 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง.....	54
ข.4 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง.....	55
ข.5 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง.....	56
ข.6 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง.....	57
ค.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน.....	59

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน.....	5
2.2 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แบบไฮโปยูเทคติกซิลิคอนผสม ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก.....	6
2.3 โครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยมีซิลิคอนร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก..	7
2.4 โครงสร้างโลหะหล่อผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แบบไฮเปอร์ยูเทคติก.....	8
2.5 แผนภาพแสดงลักษณะเสมือนของเฟสที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีทางความร้อน.....	10
2.6 โครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะการเกิดตะกอน.....	13
2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของโลหะผสมที่สามารถทำการเพิ่มความแข็งด้วยกลไก การตกตะกอน และถูกทำให้อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิมพัลส์ด้วยการบ่มแข็ง....	14
2.8 เส้นโค้งในการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิหนึ่งของโลหะผสมที่สามารถทำให้เพิ่มความแข็งด้วย กลไกการตกตะกอน.....	15
2.9 กล้องจุลทรรศน์แสง.....	16
2.10 การทดสอบแบบบรินส.....	18
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	21
3.2 เครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง.....	22
3.3 รางเทเหล็กกล้า.....	22
3.4 การอบละลาย ที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	24
3.5 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	25
3.6 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	25
3.7 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	26
3.8 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	26
3.9 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	27
3.10 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ชั่วโมง.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	28
3.12 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	28
3.13 ตำแหน่งชิ้นงาน 3 จุด ที่ใช้ทดสอบความแข็ง.....	29
4.1 โครงสร้างจุลภาคสภาพหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319.....	30
4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 หลัง ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	32
4.3 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในสภาวะหล่อ และหลังการอบ-ละลาย.....	32
4.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังผ่านการอบละลาย.....	33
4.5 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในสภาวะบ่มแข็งที่ค่าอุณหภูมิแตกต่างกัน แต่ในช่วงค่าเวลาเดียวกัน.....	34
4.6 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส...35	
4.7 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส...36	
4.8 ค่าความแข็งที่ค่าอุณหภูมิแตกต่างกัน แต่ในช่วงค่าเวลาเดียวกัน.....	37
4.9 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส...37	
4.10 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนในสภาวะบ่มแข็งในช่วงค่าเวลาต่างกัน ที่ค่าอุณหภูมิเดียวกัน.....	39
4.11 ค่าความแข็งในสภาวะบ่มแข็งในช่วงค่าเวลาต่างกัน ที่ค่าอุณหภูมิเดียวกัน.....	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงสูง และต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ ผู้ประกอบการรถยนต์จึงให้ความสนใจแผนการพัฒนารผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากอะลูมิเนียมแทนชิ้นส่วนจากเหล็ก

ในปัจจุบันโลหะผสมอะลูมิเนียมมีกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล โดยใช้กระบวนการในการอบละลาย T6 (Heat Treatment T6) เนื่องด้วยสมบัติเดิมของโลหะผสมอะลูมิเนียมจะมีค่าความแข็งต่ำ ซึ่งเมื่อนำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่อ มาศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่าเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน มีลักษณะเป็นแท่งยาวปลายแหลม ดังนั้นต้องนำชิ้นงานไปปรับปรุงโดยผ่านกระบวนการอบละลายเพื่อทำให้เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนกลมมนขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติทางกลด้านความแข็งชิ้นงานให้ดีขึ้น

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 โดยใช้กรรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลาย T6 จากการศึกษาโครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การผลิต และการนำเอาอะลูมิเนียมไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 ก่อน และหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาอุณหภูมิ และระยะเวลาในการบ่มแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของชิ้นงาน

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 ก่อน และหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

1.3.2 โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 ที่ทำการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส

1.3.3 โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ทำการบ่มแข็งด้วยระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

วิเคราะห์ และเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค สมบัติด้านความแข็ง ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 อบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วัสดุใช้ในการดำเนินงาน คือ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 เทที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ผ่านรางเทเหล็กกล้าความชัน 45° ความยาว 30 เซนติเมตร เข้าสู่เครื่องฉีดแรงดันสูงที่มีความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที

1.5.2 ศึกษากรรมวิธีทางความร้อน โดยวิธีการ T6

1.5.3 อุณหภูมิในการอบละลายที่ 495 องศาเซลเซียส ที่เวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการปล่อยเย็นตัวในน้ำที่ 65 องศาเซลเซียส

1.5.4 อัตราการให้ความร้อนในกรรมวิธีอบละลาย และการบ่มแข็งที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

1.5.5 ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส โดยบ่มแข็งที่เวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง แล้วทำการปล่อยเย็นตัวในน้ำที่ 65 องศาเซลเซียส

1.5.6 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope : OM)

1.5.7 ทดสอบความแข็งด้วยการทดสอบแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

กรกฎาคม 2555 – กุมภาพันธ์ 2556

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อน กล้องจุลทรรศน์แสง การทดสอบความแข็ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

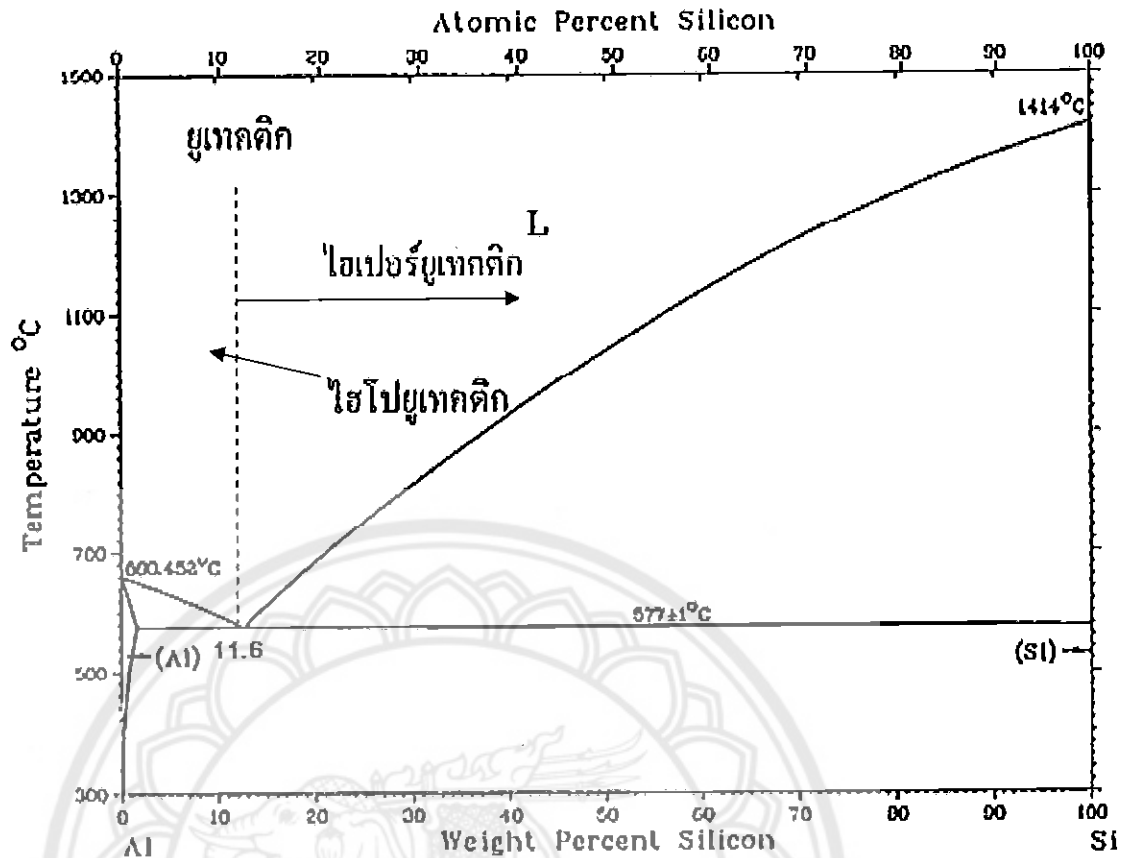
2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม

โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา ทั้งนี้เพราะโลหะผสมอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นต่ำ และความแข็งแรงสูง สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ ทนทานต่อการเกิดสนิม และการกัดกร่อนในบรรยากาศได้ดี แต่ไม่ทนต่อการกัดกร่อนต่อกรด และด่าง หาซื้อได้ง่าย และราคาไม่แพงมากนัก (พยูร, 2523)

โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นที่รู้จัก และนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั่วโลกโดยเฉพาะในงานหล่อขึ้นรูป แต่ก็จะมีปัญหาเรื่องการหดตัวของเดนไดรต์ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุต่ำลง จะเกิดระหว่างการแข็งตัว ทำให้รูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงานในโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงมีการเติมธาตุหลายตัวลงในอะลูมิเนียม เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติทางกลให้ดีขึ้น ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ทำเครื่องบิน เครื่องจักรต่างๆ และอุปกรณ์ต่างๆ เกี่ยวกับยานยนต์ (I. J. Polmear, 1989)

2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนได้รับความนิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะทั้งนี้เพราะมีสมบัติการหล่อ (Castability) ที่ดี สามารถนำไปกลึง ตัด หรือเชื่อมได้ และหากนำไปผสมกับโลหะอื่น เช่น แมกนีเซียม และทองแดง ทำให้สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลโดยกระบวนการทางความร้อนได้อีกด้วย ปัจจุบันมีการใช้งานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เป็นหลักมากถึงร้อยละ 85 ถึง 90 ของโลหะอะลูมิเนียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะเพื่อให้เกิดการผลิต และการนำเอาอะลูมิเนียมซิลิคอนไปใช้งานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ



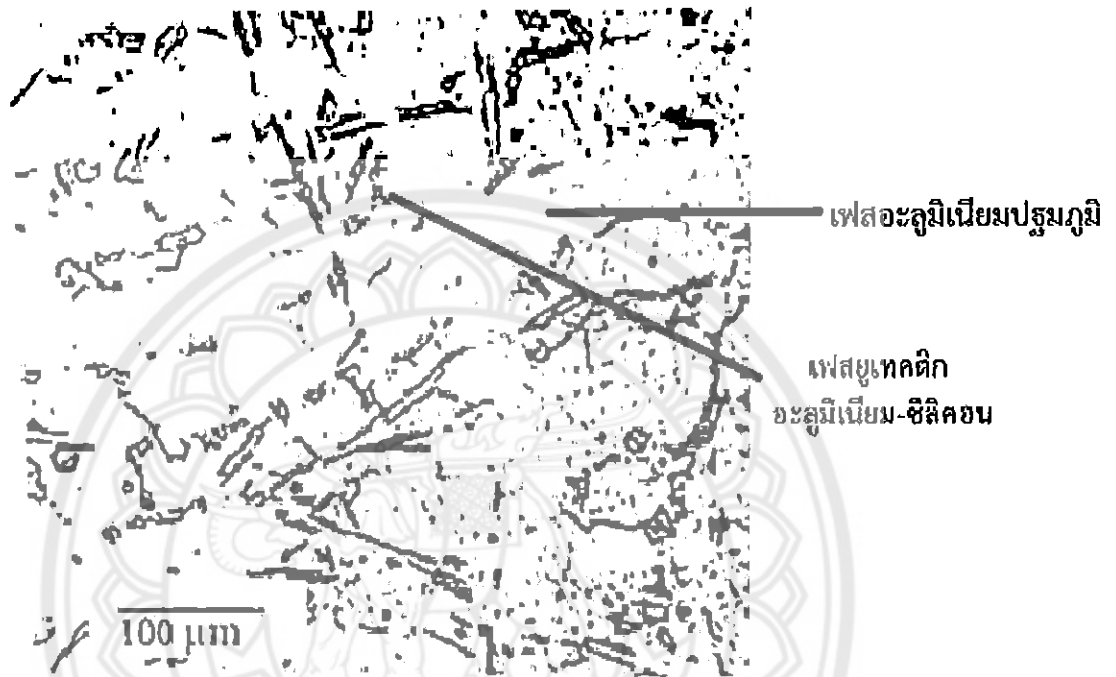
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

ที่มา: เซาวลิต (2551)

เมื่อพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.1 พบว่าที่ ส่วนผสมของซิลิคอนประมาณร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 577 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมผสมจะมีจุดหลอมเหลวต่ำสุด ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) โดยเรียกโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีส่วนผสมทางเคมี ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก นี้ว่าเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดยูเทคติก แต่หากโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีปริมาณของซิลิคอนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรดไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) และในกรณีที่ซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ทั้งนี้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แต่ละเกรดมีความต้องการเทคนิคสำหรับปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกัน และยังมีธาตุอื่นๆ ที่ผสมลงไปประกอบเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่น มีการเติมแมกนีเซียม ทองแดง และนิกเกิล โดยเมื่อเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะช่วยให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นอกจากนี้แล้วการมีทองแดงผสมอยู่ในกรณีโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติกจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการกลึง ตัด และการนำความร้อน แต่โลหะผสมจะสูญเสียความเหนียว และการต้านทานการกัดกร่อน (เซาวลิต, 2551)

2.2.1 โครงสร้างในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบไฮโปยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทคติกของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีส่วนผสมของซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 11.6 ซึ่งจะประกอบด้วยเฟสปฐมภูมิของอะลูมิเนียมที่หยาด มีลักษณะการโตของเดนไดรต์ ดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีช่วงการแข็งตัวกว้างจึงสามารถพบโพรงที่เกิดจากการหดตัวของเดนไดรต์กระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบไฮโปยูเทคติก

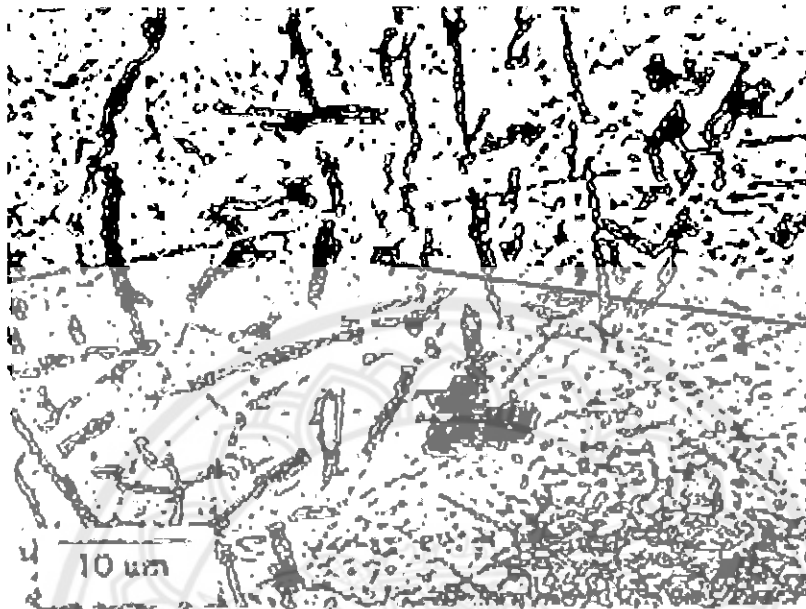
ซิลิคอนผสมร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

ที่มา: J. Pearce (2548)

2.2.2 โครงสร้างในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียมแบบยูเทคติกของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีส่วนผสมของซิลิคอนประมาณร้อยละ 11.6 ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการตกตะกอนได้ จึงต้องมีการเติมโลหะอื่นๆ การเติมแมกนีเซียม หรือทองแดง เพื่อที่จะสามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบยูเทคติกมีลักษณะของยูเทคติกซิลิคอนที่ค่อนข้างหยาด แสดงดังรูปที่ 2.3

แต่ก็สามารถปรับขนาดให้ละเอียดขึ้นได้ โดยการเติมธาตุโซเดียม หรือสตรอนเชียมในน้ำโลหะเพียงร้อยละ 0.01-0.015 โดยน้ำหนัก จะทำให้จุดยูเทคติกเลื่อนจากร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนักไปเป็นซิลิคอนร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิคอนปฐมภูมิ

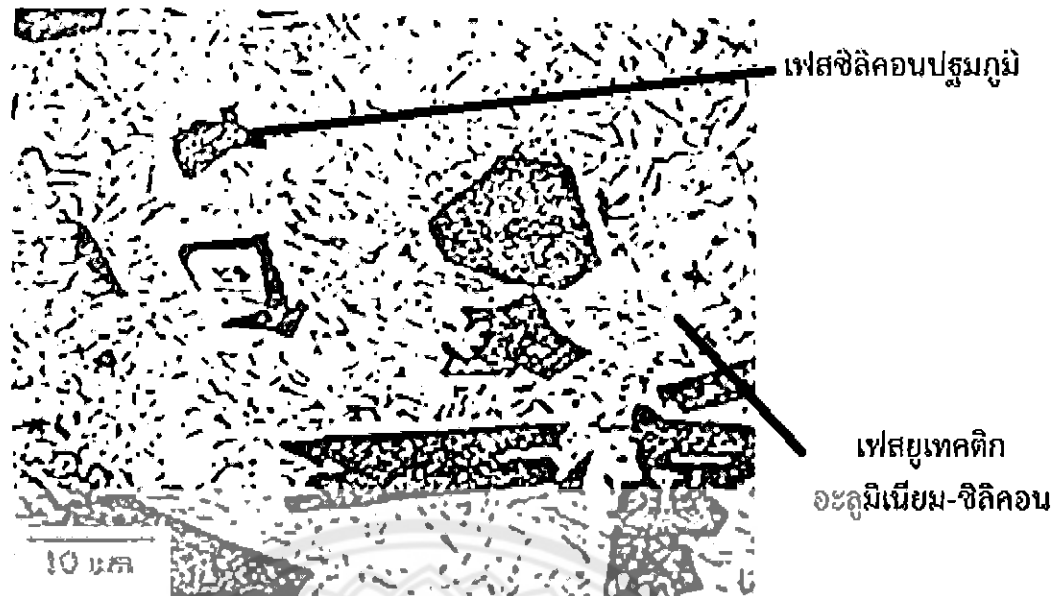


เฟสยูเทคติก
อะลูมิเนียม-ซิลิคอน

รูปที่ 2.3 โครงสร้างยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยมีซิลิคอนร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก
ที่มา: R. Cornell and H. K. D. H. Bhadeshia (1999)

2.2.3 โครงสร้างในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแบบไฮเปอร์ยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียมแบบไฮเปอร์ยูเทคติกของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.6 มีสมบัติทนต่อการเสียดสีได้ดี และมีค่าการขยายตัวเพราะความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงมักนำไปใช้งานประเภทลูกสูบที่มีการเสียดสีภายใน และเสื่อสูบเครื่องยนต์ที่ผลิตด้วยการหล่อในแม่พิมพ์ถาวร ซึ่งใช้ได้โดยไม่ต้องมีปลอกลูกสูบ โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อที่มีองค์ประกอบไฮเปอร์ยูเทคติกมีลักษณะของเฟสซิลิคอนปฐมภูมิและเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโลหะผสมอะลูมิเนียม - ซิลิคอนแบบไฮเปอร์ยูเทคติก

ที่มา: I. J. Polmear (1989)

2.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 มีข้อดีหลายประการ เช่น มีสมบัติทางด้านความสามารถในการหล่อ ความสามารถในการเชื่อม (Good Weldability) ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการกลึง เจาะ ตบแต่ง ด้วยเครื่องจักรได้ดี ในด้านการนำไปใช้งานของโลหะผสมประเภทนี้ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ครอบสูบของเครื่องยนต์เพลาช้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ รวมไปถึงอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ทางอุตสาหกรรมตัวอย่างโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 เป็นมาตรฐานที่เรียกตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา AA (Aluminum Association) มีส่วนผสมดังนี้ ซิลิคอนร้อยละ 5.5-6.5 ทองแดงร้อยละ 3.0-4.0 แมกนีเซียมสูงสุดร้อยละ 0.1 เหล็กสูงสุดร้อยละ 1.0 แมงกานีสสูงสุดร้อยละ 0.5 ไทเทเนียมสูงสุดร้อยละ 0.25 และสังกะสีสูงสุดร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนัก

มาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับการแบ่งชนิดของอะลูมิเนียมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะในประเทศไทย คือ มาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (AA) ที่ได้สรุปอะลูมิเนียมเกรดที่นิยมใช้งาน และส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ
(ร้อยละโดยน้ำหนัก)

มาตรฐาน	ซิลิคอน	ทองแดง	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส	ไทเทเนียม	สังกะสี
Al	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn
A319.0	5.5-6.5	3.0-4.0	<0.1	<1.0	<0.5	<0.25	<3.0
A319.1	5.5-6.5	3.0-4.0	<0.1	<0.8	<0.5	<0.25	<3.0
A332.2	10.5-13.5	0.8-1.5	0.9-1.5	<0.6	<0.35	-	<0.35
A356.0	6.5-7.5	<0.2	0.25-0.45	<0.2	<0.1	<0.2	<0.1
A360.2	9.0-11.0	<0.03	0.25-0.45	<0.4	<0.45	-	<0.1
A390.0	16.0-18.0	4.0-5.0	0.45-0.65	<0.5	<0.1	<0.2	<0.1

ที่มา: เซวาลิต (2551)

2.4 การเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมหล่อโดยกรรมวิธีทาง- ความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)

กรรมวิธีทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมหล่อได้มีการกำหนดสัญลักษณ์ของกระบวนการทาง
ความร้อน โดยสมาคมทดสอบวัสดุของอเมริกา (ASTM : American Society for Testing and
Materials) ดังนี้

- F คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน
- O คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อหลังการอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดความเครียดด้วยความร้อน
และป้องกันการขยายตัวในขณะใช้งาน มีสมบัติด้านความเหนียวที่ดี แต่ความต้านทานแรงดึงต่ำ
- H คือ สภาพของอะลูมิเนียมผสมหล่อที่ได้ผ่านกระบวนการทางกล เพื่อให้มีความแข็งแรงสูง
เพิ่มขึ้น
- W คือ การอบละลาย จากนั้นทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (Quenching) โดยอาจปล่อยให้เย็นตัว
ในอากาศ
- T1 คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อที่เย็นตัวภายในบรรยากาศปกติจนถึงอุณหภูมิห้องหลังจากการ
หล่อ จากนั้นนำไปทำการบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging)
- T2 คือ อบอ่อน (Annealed) (ใช้เฉพาะสำหรับงานหล่อเท่านั้น)
- T3 คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) และการขึ้น
รูปแบบเย็น หมายถึง อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปขึ้นรูปแบบเย็น เพื่อเพิ่ม
ความแข็งแรง
- T4 คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) หลังจากนั้นทำให้
เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging) เพื่อให้ได้
สมบัติความต้านทานแรงดึงที่ดี

T5 คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อหลังทำการบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) เพียงอย่างเดียวเพื่อป้องกันการขยายตัวของเกรน และเพิ่มความมีเสถียรภาพของขนาดของโลหะผสม

T6 คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) หลังจากนั้นนำมาบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) ส่งผลให้มีสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยไม่เสียสมบัติการยึดตัว ทำให้โครงสร้างยูเทคติกที่รวมตัวอยู่กับสารประกอบอะลูมิเนียมผสมหล่อละลายลงสู่พื้นหลัก ซึ่งทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.5

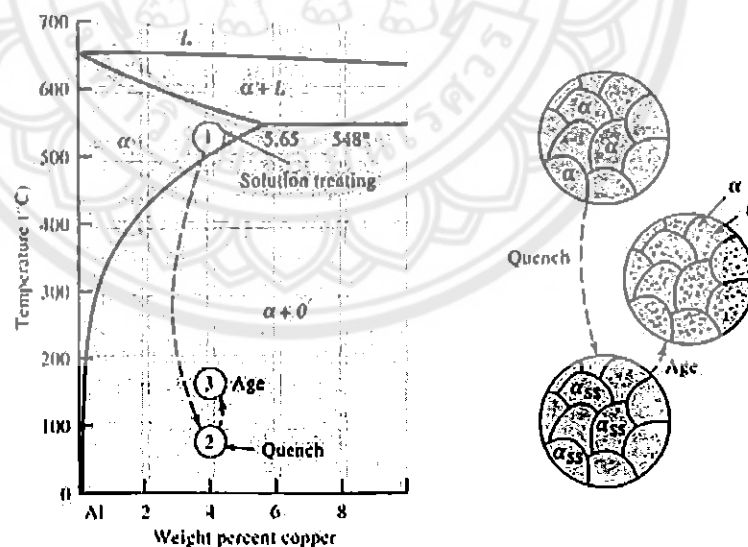
T7 คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) หลังจากนั้นนำมาบ่มแข็งเทียมเป็นเวลานาน (Overaging) เพื่อให้สมบัติการยึดตัวสูงขึ้น

T8 คือ การอบละลาย (Solution Treatment) และขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Worked) แล้วทำการบ่มแข็ง

T9 คือ การอบละลาย (Solution Treatment) แล้วทำการบ่มแข็ง (Aging) หลังจากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง

T10 คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผ่านการบ่มแข็ง และการขึ้นรูปแบบเย็น (Aging and Cold Worked)

การเพิ่มความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ โดยกรรมวิธีทางความร้อน ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 3 กระบวนการย่อย ดังแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงลักษณะเสมือนของเฟสที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีทางความร้อน

ที่มา: R. Askeland (1994)

จุดที่ 1 การทำให้เป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิสูง เพื่อปรับองค์ประกอบภายในเฟสปฐมภูมิ α -Al ให้มีความเป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอ และเกิดเป็นสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด

จุดที่ 2 ทำการให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยการปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ เพื่อรักษาสภาพของสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด

จุดที่ 3 ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำ โดยการให้ความร้อนสูงกว่าจุดที่ 2 เล็กน้อย เพื่อให้สารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดเกิดการตกตะกอน

2.4.1 การอบเป็นสารละลายของแข็ง (Solution Heat Treatment)

การอบเป็นสารละลายของแข็งวิธีนี้เรียกสั้นๆ ได้ว่า อบละลาย ซึ่งมีวัตถุประสงค์ต้องการให้โลหะผสมอะลูมิเนียมละลายเป็นเนื้อเดียวกับอะลูมิเนียม การทำให้โลหะผสมในอะลูมิเนียมละลายนั้นต้องอยู่ในช่วง Solution treating เป็นเวลานานจนทำให้โลหะผสมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับอะลูมิเนียมทั้งหมด หลังจากนั้นนำไปชุบลงในตัวกลางที่ให้อัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว เช่น น้ำ การเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วนั้นส่งผลให้โลหะผสมที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมแยกตัวออกมาไม่ทันเมื่อถึงอุณหภูมิห้อง และจะกลายเป็นสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด อุณหภูมิสำหรับการอบเป็นสารละลายของแข็งจะใกล้เคียงกันกับการเกิดสารประกอบยูเทคติก โดยจะต่ำกว่าเล็กน้อย ดังนั้น จึงต้องมีความระมัดระวังเรื่องอุณหภูมิอย่างเข้มงวด เพื่อหลีกเลี่ยงการหลอมของวัสดุในระหว่างการอบ โดยทั่วไปจะใช้เตาที่มีการอัดอากาศภายในเตาตลอดเวลา เพื่อให้ทำให้อุณหภูมิภายในเตากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เพราะในงานหล่อที่ได้รับอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน อาจเกิดความร้อนสะสมเฉพาะจุด และเกิดการหลอมเฉพาะจุดในบริเวณเล็กๆ นอกจากนี้การเกิดความร้อนสะสมสูงในชิ้นงาน จะเกิดผลเสียอย่างถาวร อาจถึงขั้นสูญเสียสมบัติจนไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ และสำหรับงานหล่อทั้งแบบเทขึ้นรูป และแบบใช้แรงดัน สามารถเกิดการตกตะกอนได้โดยไม่ต้องผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็ง เนื่องจากอัตราการเย็นตัวหลังการหล่อพอเพียงสำหรับการละลายของอะตอมที่มากเกินไปในโครงสร้างผลึก อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงาน จึงมีความจำเป็นต้องผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็งก่อนที่จะทำการบ่มแข็ง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมเกิดการบิดตัวไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น (J. Pearce, 2548)

2.4.2 การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)

เป็นการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อคงสภาพของการเป็นสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด ณ อุณหภูมิสูง ให้เป็นสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดที่อุณหภูมิห้อง การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว สามารถทำได้หลายรูปแบบ เพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดตะกอนที่มีผลให้สมบัติทางกล หรือสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง อุณหภูมิเหมาะสมที่ใช้ในการชุบน้ำจะอยู่ที่ 65-85 องศาเซลเซียส

2.4.3 การบ่มแข็ง (Aging)

หลังจากผ่านการทำเป็นสารละลายของแข็ง และทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วแล้วขั้นต่อไป คือ การบ่มแข็ง ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging) คือ การนำชิ้นงานไปปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง และการบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) โดยจะใช้อุณหภูมิสูงกว่า โลหะบางกลุ่มอยู่ในอุณหภูมิห้องเพียงไม่กี่วัน ก็สามารถเกิดตะกอน และทำให้มีค่าจุดคราก (Yield) สูงเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานหลายประเภท แต่สำหรับโลหะบางกลุ่มจะต้องอาศัยความร้อนในการเกิดตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรง ซึ่งรายละเอียดของทั้ง 2 วิธี มีดังนี้

2.4.3.1 การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging)

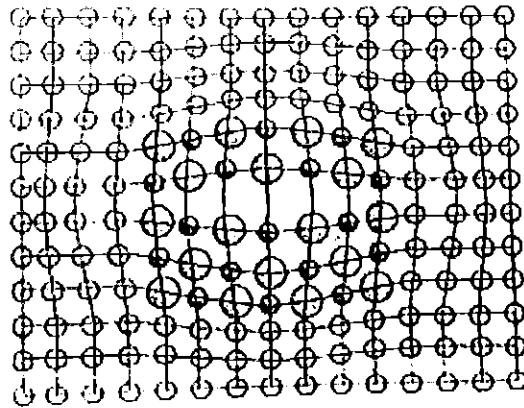
โลหะที่บ่มแข็งด้วยวิธีนี้ทำในโลหะผสม ส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่ม 2xx.x กลุ่ม 3xx.x ที่มีทองแดงเป็นส่วนผสม โดยประกอบด้วยการทำเป็นสารละลายของแข็ง ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว และปล่อยให้เกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึง ความเหนียว และสามารถต้านทานความล้าได้สูง โลหะผสมที่จะเพิ่มความแข็งด้วยวิธีนี้ เมื่อถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วแล้ว จะต้องมียะตอมละลายอยู่อย่างอิมิตัวยิ่งยวด เพื่อให้เกิดการตกตะกอนได้ภายในทันที และความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน การเพิ่มความแข็งแรงวัสดุโดยการปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหนึ่งไม่เกิน 5 วัน

2.4.3.2 การบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging)

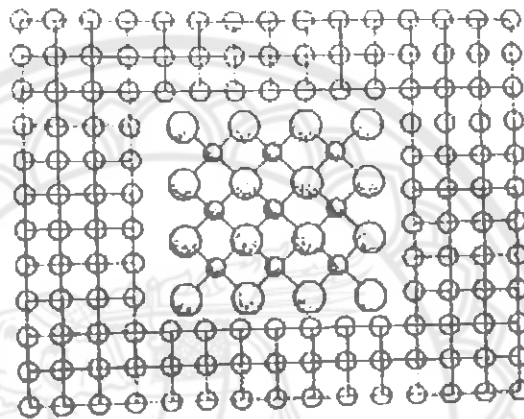
โลหะอะลูมิเนียมผสมส่วนใหญ่จะต้องอาศัยความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องในการเกิดตะกอน จากกรณีนี้โดยทั่วไปจะบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำในระหว่างช่วง 150-250 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน เพื่อให้ตะกอนที่เกิดในระหว่างการบ่มแข็งมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ส่วนสมบัติทางกลสุดท้ายที่ต้องการขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง ดังนั้นจึงต้องนำเวลาในการบ่มแข็งมาพิจารณาด้วยเสมอ นอกจากนี้ยังพิจารณาระบบของโลหะผสมที่ใช้ด้วย เฟสที่ตกตะกอนจะแตกต่างกัน

การทำให้อะลูมิเนียมมีความแข็งแรง จะต้องทำให้โครงสร้างพื้น และตะกอนเกิดลักษณะโคฮีเรนต์ (Coherent) หรือเกิดในลักษณะเซมิโคฮีเรนต์ (Semi-Coherent) แสดงดังรูปที่ 2.6 ก) และมีการกระจายตัวของตะกอนอย่างสม่ำเสมอ ชิ้นงานจะมีความเค้นสูงเป็นพิเศษ เพราะดิสโลเคชัน (Dislocation) เคลื่อนที่ผ่านตะกอนลักษณะดังกล่าวได้ยาก ความเครียดที่เกิดจากแรงเฉือนจึงสูง ซึ่งลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีขนาดประมาณ 10-100 นาโนเมตร

การบ่มแข็งนานขึ้นจะส่งผลให้สมบัติด้านความแข็งแรงลดลง เรียกว่า การบ่มเกินขนาด (Overaging) โดยตะกอนละเอียดความแข็งแรงจะลดลง แล้วแทนที่ด้วยอนุภาคที่หยาบ โดยจะมีการแยกกันอย่างชัดเจนระหว่างโครงสร้างกับพื้นผิวของตะกอน แสดงดังรูปที่ 2.6 ข) ซึ่งแสดงลักษณะตะกอนอินโคฮีเรนต์ (Incoherent) ในโครงสร้างหลัก และมีแนวโน้มที่ทำให้ความแข็งแรงที่เกิดขึ้น ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งอาจเป็นเพราะช่องว่างระหว่างอะตอมที่เพิ่มขึ้น และจำนวนตะกอนลดลงสมบัติทางกลจึงลดลง



ก)



ข)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะการเกิดตะกอน

ก) ลักษณะตะกอนแบบโคฮีเรนต์

ข) ลักษณะตะกอนแบบอินโคฮีเรนต์

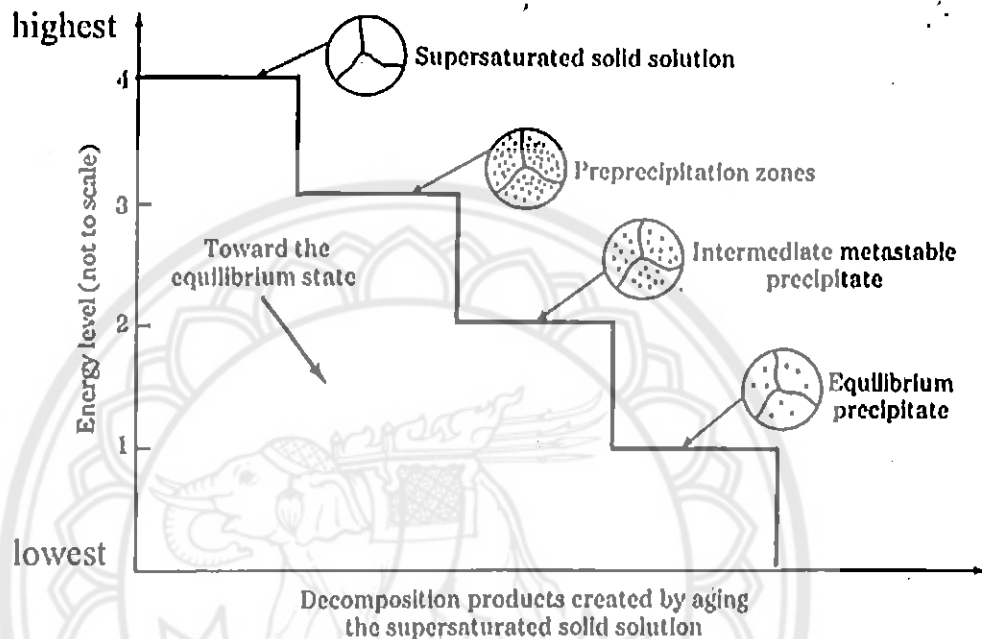
ที่มา : R. Askeland (1994)

2.4.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดในระหว่างการบ่มแข็ง

โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอนแล้ว ในขั้นตอนแรกจะอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวด ในสภาวะนี้โลหะผสมจะมีพลังงานสูงมากในระดับพลังงานตำแหน่งที่ 4 แสดงดังรูปที่ 2.7 ที่ระดับพลังงานนี้โลหะผสมจะไม่อยู่ตัว และมีแนวโน้มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดไปยังเฟสที่มีพลังงานต่ำกว่าได้เสมอ ซึ่งอาจจะเป็น (Metastable Phase) หรือเฟสสมดุล (Equilibrium Phase) โดยเกิดขึ้นเอง

เมื่อโลหะผสมที่อยู่ในสถานะสารละลายอิมิตัวยิ่งยวดถูกทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีพลังงานกระตุ้นค่อนข้างน้อย อะตอมอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเรียกว่า Precipitation Zone หรือ GP Zone แสดงด้วยจุดดำๆ ดังแสดงในระดับพลังงานตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 2.7

และเมื่อทำการบ่มแข็งต่อไป หรือมีพลังงานกระตุ้นมากเพียงพอจะทำให้การบ่มแข็งบริเวณ GP Zone นี้จะมีจุดดำที่ใหญ่ขึ้น ดังแสดงในระดับพลังงานตำแหน่งที่ 2 แสดงในรูปที่ 2.7 และถ้ามีการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงต่อไปเรื่อยๆ หรือมีพลังงานกระตุ้นสูงขึ้นเพียงพอในจุด (Pre-Precipitation Zone) เหล่านี้จะเปลี่ยนเป็นเฟสที่มีความสมดุลมากขึ้น ดังแสดงในระดับพลังงานตำแหน่งที่ 1 แสดงในรูปที่ 2.7 (แมน และสมชัย, 2544)

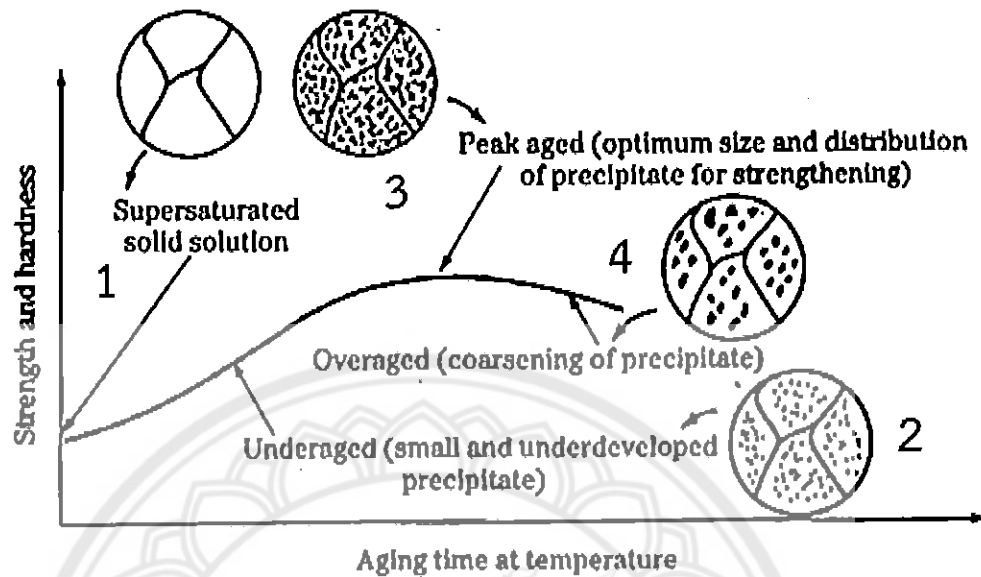


รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของโลหะผสมที่สามารถเพิ่มความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอน และถูกทำให้อยู่ในสภาวะสลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดโดยการบ่มแข็ง
ที่มา: แมน และสมชัย (2544)

2.4.5 ผลของเวลาในการทำการบ่มแข็งต่อความแข็ง และความแข็งแรงของโลหะผสมที่สามารถถูกเพิ่มความแข็งด้วยกลไกการตกตะกอน

ผลของการบ่มแข็งต่อความแข็งของโลหะผสมที่ผ่านกระบวนการอบละลาย และชุบน้ำ สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้ง (Aging Curve) กราฟของเส้นโค้งการบ่มแข็งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และความแข็งแรงกับเวลาในการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิใดๆ ณ ตำแหน่งที่ 1 ที่จุด (Supersaturated solid solution) ในเวลาเท่ากับศูนย์ โลหะจะอยู่ในสภาพเป็นสลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวด และต่อมาเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงตำแหน่งที่ 2 ที่จุด Underaged หรือเรียกว่า บริเวณ GP Zones จะเริ่มเกิดของตะกอน และขนาดค่อยๆ ใหญ่ขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จนกระทั่งในเวลาต่อมา มีความแข็งเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุด ในตำแหน่งที่ 3 จุดนี้จะเรียกว่า Peak aged ในช่วงนี้จะเกิดตะกอนที่กระจายตัวอยู่มากทั่วๆ โลหะผสม และในเวลาต่อมาถ้ายังมีการบ่มแข็งต่อไป โลหะผสมจะเริ่มหยาบขึ้นและตะกอนที่กระจายตัวอยู่มากก็จะค่อยๆ รวมตัวกัน

เป็นตะกอนขนาดใหญ่ และทำให้เฟสยูเทคติกมีลักษณะเป็นทรงกลม ในตำแหน่งที่ 4 เรียกว่า Overaged ส่งผลให้มีค่าความแข็งต่ำลง แสดงในรูปที่ 2.8



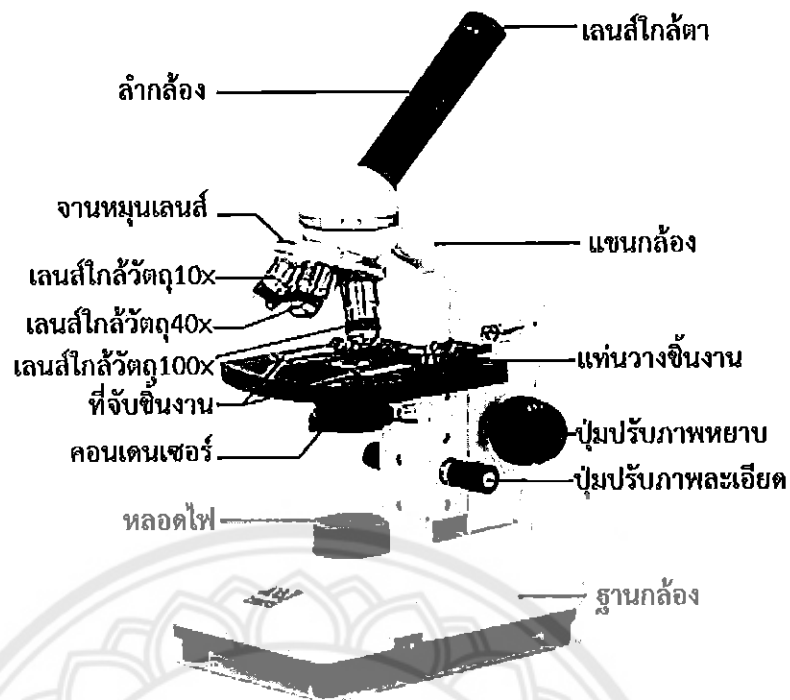
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งในการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิหนึ่งของโลหะผสมที่สามารถทำให้เพิ่มความแข็งด้วย กลไกการตกตะกอน

ที่มา: แม้น และสมชัย (2544)

2.5 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope : OM)

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ใช้ขยายขอบเขตของการมองเห็นอีกชนิดหนึ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น ใช้สำหรับส่องดูวัตถุเล็กๆ ให้เห็นชัดขึ้น กล้องจุลทรรศน์แสง คือ กล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงใช้ส่องให้เห็นวัตถุ ขยายใหญ่กว่าเดิมได้อย่างมากที่สุดประมาณสองพันเท่า ไม่อาจมีกำลังขยายที่ใหญ่ขึ้นไปกว่านี้อีกได้ เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นภายในกล้องจุลทรรศน์เป็นภาพที่เกิดจากคลื่นแสง ซึ่งมีขีดจำกัดขึ้นกับขนาดของภาพกับช่วงคลื่นของแสง ถ้าภาพมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับช่วงคลื่นของแสง ก็จะไม่อาจส่องขยายภาพให้เห็นใหญ่มากๆ ได้ แสดงดังรูปที่ 2.9

กล้องจุลทรรศน์แสงที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ สามารถที่จะช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดได้สูงสุด ในระดับของช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตรเพียงเท่านั้น (หรือที่ดี่ที่สุดก็อยู่ในช่วงระดับความละเอียด 200-400 นาโนเมตร) (วิรุจน์, 2553)



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์แสง
ที่มา: วิรุจน์ (2553)

2.5.1 วิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แสง

- 2.5.1.1 ตั้งลำกล้องให้ตรง
- 2.5.1.2 เปิดไฟเพื่อให้แสงเข้าลำกล้องได้เต็มที่
- 2.5.1.3 หมุนเลนส์ใกล้วัตถุ ให้เลนส์ที่มีกำลังขยายต่ำสุดของลำกล้อง
- 2.5.1.4 นำชิ้นงานที่จะศึกษามาวางบนแท่นวางชิ้นงาน โดยปรับให้อยู่กลางบริเวณที่แสงผ่าน
- 2.5.1.5 ค่อยๆ หมุนปุ่มปรับภาพหยาบให้กล้องเลื่อนขึ้นช้าๆ เพื่อหาระยะภาพ แต่ต้องระวังไม่ให้เลนส์ใกล้วัตถุกระทบกับสไลด์ตัวอย่าง เพราะจะทำให้เลนส์แตกได้
- 2.5.1.6 ปรับภาพให้ชัดเจนขึ้นด้วยปุ่มปรับภาพละเอียด ถ้าวัตถุที่ศึกษาไม่อยู่ตรงกลาง ให้เลื่อนชิ้นงานให้มาอยู่ตรงกลาง
- 2.5.1.7 ถ้าต้องการให้ภาพขยายใหญ่ขึ้นให้หมุนเลนส์ ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยายสูงกว่าเดิมมาอยู่ในตำแหน่งแนวของลำกล้อง จากนั้นปรับภาพให้ชัดเจนด้วยปุ่มปรับภาพละเอียดเท่านั้น ห้ามปรับภาพด้วยปุ่มปรับหยาบเพราะจะทำให้ระยะของภาพ หรือจุดโฟกัสของภาพเปลี่ยนไป
- 2.5.1.8 บันทึกกำลังขยายโดยหาได้จากผลคูณของกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ กำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา

2.5.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์แสง

ในการเตรียมชิ้นงานนี้จะต้องมีผงขัดทำหน้าที่ขัดดูแลผิวชิ้นงานออกไป จนได้คุณภาพของผิวงานที่เราต้องการ ผงขัดที่มีขนาดละเอียดมากๆ จะยิ่งทำให้ผิวชิ้นงานเรียบยิ่งขึ้นเท่านั้น การเตรียมชิ้นงานจะเสร็จสิ้นขึ้นอยู่กับความต้องการผิวชิ้นงานที่ยอมรับได้ การเตรียมชิ้นงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่

2.5.2.1 การขัด (Grinding) ปกติแล้วในขั้นตอนนี้จะเอาผิวของชิ้นงานที่เสียหายหรือแปรรูปไปบ้างในขั้นตอนการตัดออกไป ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้ผิวที่เกิดขึ้นใหม่เกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเมื่อนำมาขัดละเอียด (Fine Grinding) จะสามารถขจัด ความเสียหายเล็กน้อยที่หลงเหลืออยู่นั้นในระยะเวลาอันสั้น การขัดแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

ก. การขัดระนาบ (Plane Grinding; PG) การขัดระนาบเป็นขั้นตอนแรกในการขัดผิวชิ้นงาน เพื่อปรับแต่งผิวชิ้นงานให้มีระนาบผิวที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยใช้กระดาษทราย

ข. การขัดละเอียด (Fine Grinding; FG) ผิวที่เกิดจากการขัดละเอียดจะมีความเสียหายเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย โดยใช้กระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดต่างกันในการขัด จะเริ่มจากขัดด้วยกระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดต่ำไปจนถึงมีขนาดละเอียดสูงเพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเสียหายเหลือน้อยที่สุด

2.5.2.2 การขัดมัน (Polishing) มีวิธีการเหมือนกับการขัดระนาบเพียงแต่ทำหน้าที่ขัดผิวที่เสียหาย เนื่องจากขั้นตอนการขัดละเอียดออกไป เพื่อที่จะได้ผิวที่ดีกว่าโดยไม่ทำให้ผิวเกิดความเสียหายขึ้นอีก การขัดมันแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

ก. การขัดมันด้วยผงขัดเพชร (Diamond Polishing; DP) ผงขัดเพชรเป็นผงขัดที่ใช้ในงานขัดที่มีความละเอียดสูง และในการขัดด้วยผงขัดเพชรจะได้ระนาบที่ดีที่สุด ทำให้ลดเวลาในการขัดลงได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากผงขัดมีความแข็งประมาณ 8000 HV ทำให้สามารถขัดวัสดุได้ทุกชนิด

ข. การขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing; OP) คือ การขัดมันในวัสดุที่มีความเหนียวและนิ่ม ๆ เป็นขบวนการสุดท้ายของการขัดมัน เช่น ผงขัดอะลูมินา เป็นการขัดมันวัสดุที่มีความเหนียว

2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสี และการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปอย่างถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ มีวิธีการทดสอบหลายวิธีที่นิยมเช่น บริเนลล์ (Brinell Hardness Test) ร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness test) วิคเกอร์ส (Vickers Hardness Test) และนูป (Knoop Hardness Test) เป็นต้น วิธีการทั้งหลายนี้นิยมใช้กันทั่วไปในการทดสอบความแข็งทางวิศวกรรม และแต่ละวิธีมี

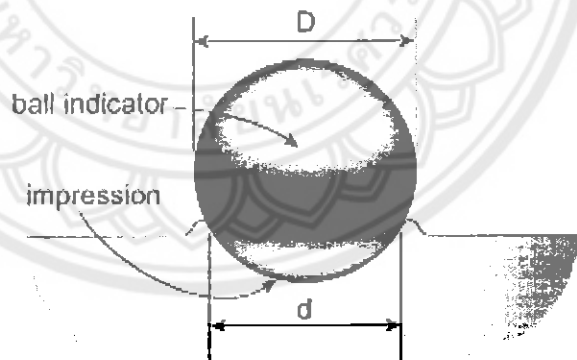
กฎพื้นฐานเดียวกัน คือความแข็งวัดจากรอยกดที่เกิดขึ้นด้วยการให้น้ำหนักกดลงบนหัวกดที่ผิวของวัสดุในช่วงเวลาจำกัด

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ประกอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้า หรือลูกบอลคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0-10 มิลลิเมตร แรงกดสำหรับทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุที่อ่อนสามารถรับภาระแรงที่ 1500 กิโลกรัมแรง หรือ 500 กิโลกรัมแรง เพื่อหลีกเลี่ยงรอยกดที่มากเกินไป โดยจะใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้า และ 30 วินาที สำหรับโลหะอ่อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เหลืออยู่บนวัสดุทดสอบ จะถูกวัดโดยกล้องขยายกำลังต่ำ ค่าความแข็งจะคำนวณจากการหารภาระที่ใช้ด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด จะใช้สูตรคำนวณค่าความแข็งดังสมการที่ 2.1

$$HB = \frac{F}{\frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

- โดยที่ HB คือ ค่าความแข็งแบบ Brinell (กิโลกรัมแรงต่อตารางมิลลิเมตร)
 F คือ แรงกด (กิโลกรัมแรง)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (มิลลิเมตร)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.10 การทดสอบแบบ Brinell

ที่มา: ฐานนิยม (2554)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่ใช้คำนวณ เป็นค่าเฉลี่ยจากการอ่านค่าสองครั้งตั้งฉาก การแสดงค่าความแข็งแบบบริเนลสามารถแสดงให้เห็นสภาวะของการทดสอบ เช่น 75 HB 10/500/30 หมายความว่า ค่าความแข็ง 75 ใช้ลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภาระ 500 กิโลกรัมแรง เป็นระยะเวลา 30 วินาที สำหรับทดสอบโลหะที่มี

ความแข็งแรงมาก อาจใช้ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์แทนลูกบอลเหล็ก เปรียบเทียบการทดสอบความแข็งแรงกับวิธีการทดสอบความแข็งแรงแบบอื่นๆ ลูกบอลเหล็กของบริเนลสามารถสร้างรอยกดที่ลึก และกว้าง ดังนั้นการทดสอบความแข็งแรงจะเฉลี่ยความแข็งแรงปริมาณเนื้อวัสดุที่มากกว่าซึ่งจะให้ความถูกต้องกับโครงสร้างเกรนที่ซับซ้อน และไม่สม่ำเสมอในความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุวิธีนี้ดีที่สุดเพื่อหาความแข็งแรงมหภาค โดยเฉพาะวัสดุที่โครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

E.Sjölander และ S.Seifeddine (2011) ได้ศึกษาการบ่มแข็งของโลหะผสม-อะลูมิเนียมผสมที่ได้หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ด้วยวิธี T6 การบ่มแข็งทำเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมในด้านเพิ่มความแข็งแรง การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาที่อุณหภูมิการบ่มแข็งที่ 170 และ 220 องศาเซลเซียส ที่เวลาที่แตกต่างกัน ผลที่ได้โลหะอะลูมิเนียมที่ถูกบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 ชั่วโมง จะมีความแข็งแรงมากที่สุด แต่โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ถูกบ่มแข็งโดยให้อุณหภูมิสูงใช้เวลาในการบ่มต่ำจะพบว่ามีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

E.Sjölander และ S.Seifeddine (2010) ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงโลหะผสม-อะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และอิทธิพลต่อสมบัติทางกล โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 519 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และอบละลายที่อุณหภูมิ 505 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150, 160, 170, 180, 190, 200 และ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และเสร็จสิ้นกระบวนการ ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness) พบว่าชิ้นงานที่อบละลายที่อุณหภูมิ 505 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ทำการบ่มแข็งด้วยช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุด สรุปได้ว่า ชิ้นงานที่ใช้เวลาอบละลายนานที่สุด และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าความแข็งแรงมาก

O. El Sebaiea และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิปรับปรุงที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319.1 และ A356 โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอนการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ชุบน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และทำอีกกระบวนการโดยไม่ทำการชุบน้ำแต่ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 155, 180, 200, 220 และ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งแรง ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A319.1 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส บ่มแข็งที่เวลา 5 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุด แต่ชิ้นงานที่ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบน้ำ

M.Tash และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 และ A319 ที่ได้จากการหล่อ และอธิบายเกี่ยวกับการหล่อ และการอบละลายของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 และ A319 โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่

ใช้ในการหล่อ และการอบละลายที่เหมาะสม โดยการทดลองทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 และ 495 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 155, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเมื่อเสร็จกระบวนการ ได้นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness) พบว่า โลหะผสมอะลูมิเนียม ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะมีความแข็งมากที่สุด

E.cerri และคณะ (2000) ได้ทำการทดลองโดยนำโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A319 ที่ผ่านการหล่อแบบ Thixocast มาทำการให้ความร้อนด้วยกรรมวิธีทางความร้อน T4, T5 และ T6 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทำการวัดค่าความแข็ง โดยสรุปว่าชิ้นงานที่กรรมวิธีทางความร้อน T6 มีค่าความแข็งสูงสุด แต่กรรมวิธีทางความร้อน T4 และ T5 จะมีค่าความเหนียวสูงกว่า T6



บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

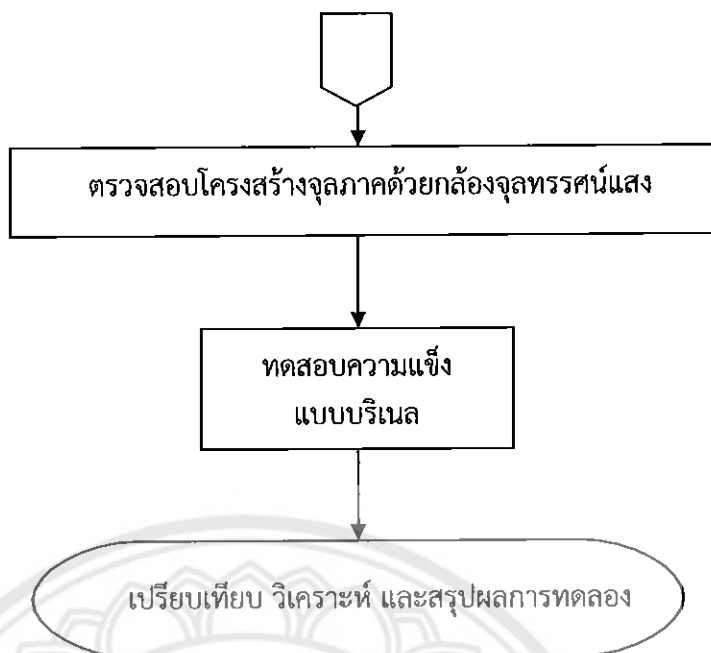
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินโครงการ ซึ่งจะอธิบายถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน วิธีการดำเนินงาน รวมไปถึงวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ

ในการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน T6 ขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

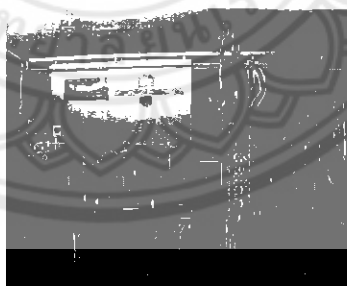


รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงาน

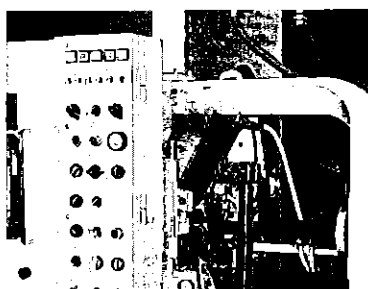
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 เทที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ผ่านรางเทเหล็กกล้าความชัน 45° ความยาว 30 เซนติเมตร เข้าสู่เครื่องฉีดแรงดันสูงที่มีความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 เครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง



รูปที่ 3.3 รางเทเหล็กกล้า

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

เกรด	อะลูมิเนียม (Al)	ซิลิคอน (Si)	ทองแดง (Cu)	แมกนีเซียม (Mg)	เหล็ก (Fe)	แมงกานีส (Mn)	ไทเทเนียม (Ti)
A319	89.0273	6.0	3.8	0.36	0.5	0.30	0.0127

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ข. เตาอบอุณหภูมิสูง
- ค. เครื่องขัดโลหะ
- ง. กระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 600, 800, 1000 และ 1200
- จ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียดขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน

3.2.2.2 สารเคมี

- ก. กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)
- ข. น้ำกลั่น

3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope : OM)
- ข. เครื่องทดสอบความแข็งบริเนล (Brinell Hardness Test)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ศึกษา และรวบรวมข้อมูล

3.3.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319

3.3.1.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)

3.3.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุ

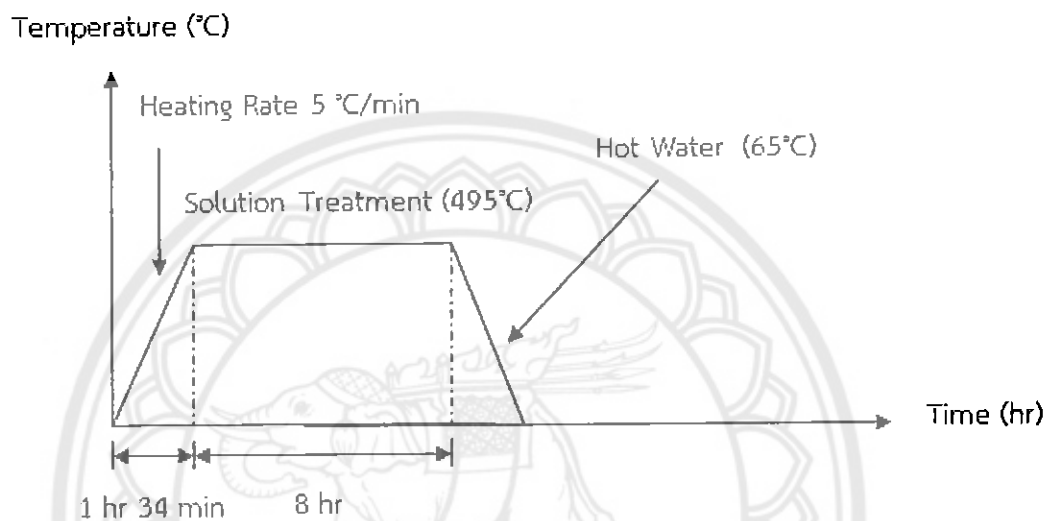
3.3.2 เตรียมชิ้นงานทดสอบพร้อมนำไปอบ

ตัดชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ผ่านร่างเทเหล็กกล้าความชัน 45° ความยาว 30 เซนติเมตร เข้าสู่เครื่องฉีดแรงดันสูงที่มีความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที ด้วยเครื่องตัดชิ้นงานโดยตัดที่บริเวณปลายชิ้นงาน และกลางชิ้นงาน

3.3.3 กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)

3.3.3.1 การอบละลาย (Solution Treatment)

การอบละลาย โดยการนำชิ้นงานไปทำกรรมวิธีทางความร้อนด้วยวิธีการอบละลาย ที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และมีอัตราการให้ความร้อนในกรรมวิธีอบละลายที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังแสดงรูปที่ 3.4



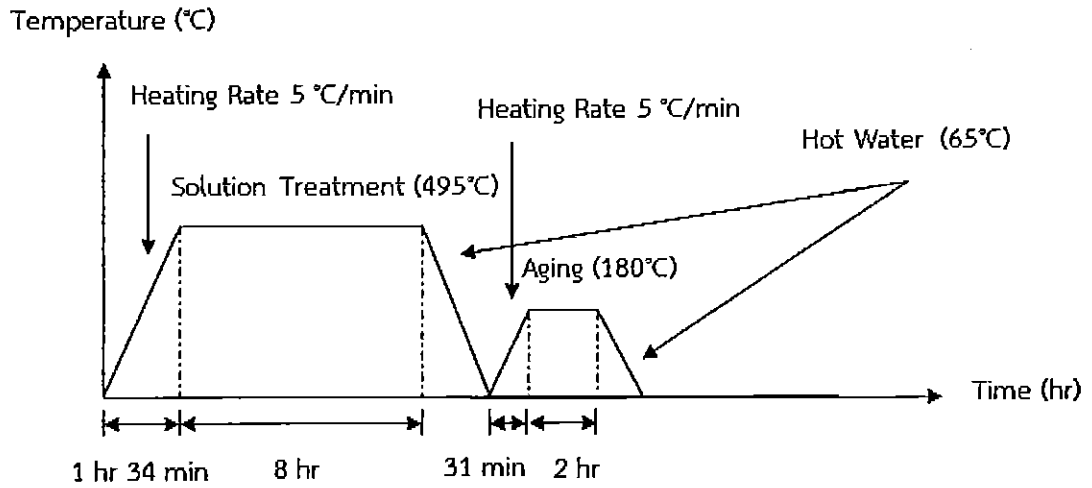
รูปที่ 3.4 การอบละลาย ที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.3.3.2 การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)

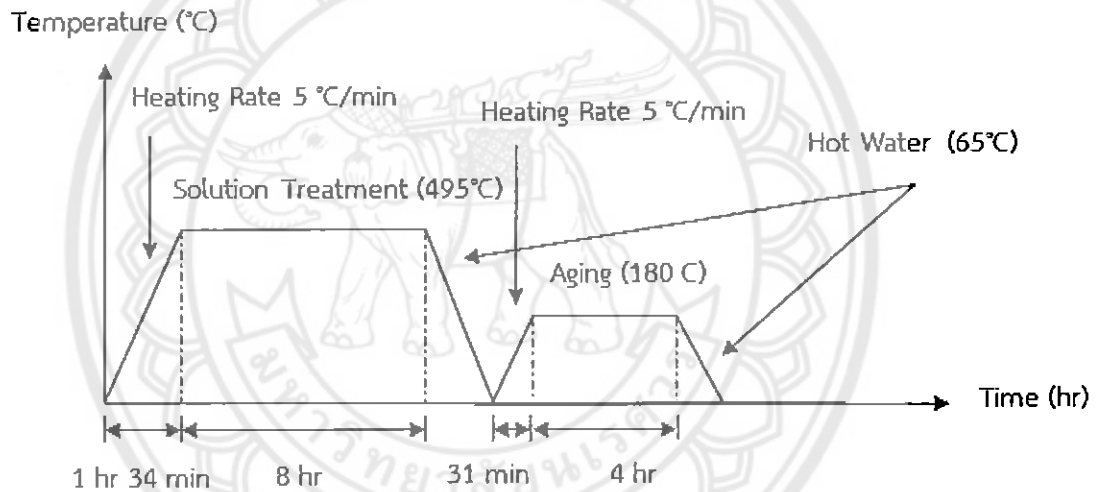
การนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มาทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ในการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แสดงดังที่รูป 3.4

3.3.3.3 การบ่มแข็ง (Aging)

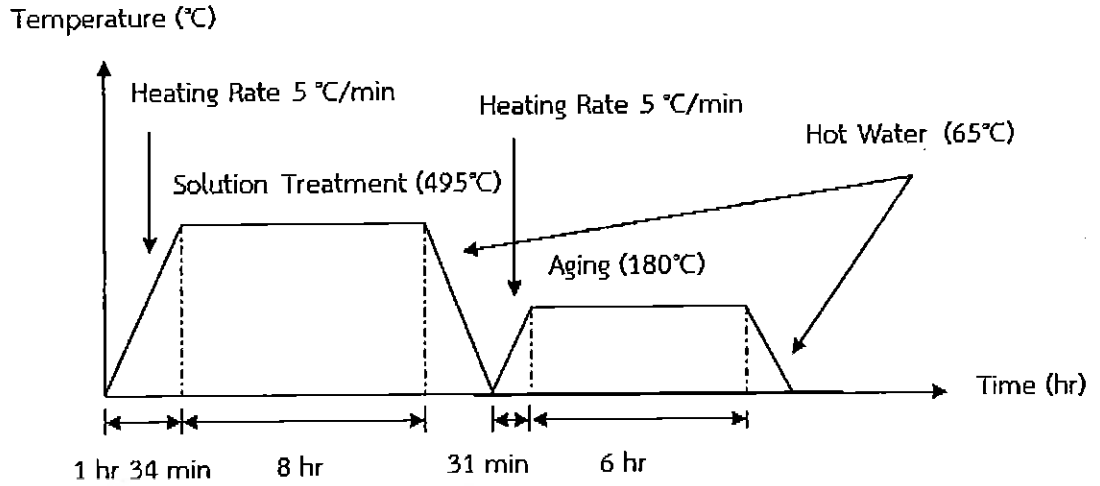
นำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แล้วนำไปบ่มแข็งที่ อุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง มีอัตราการให้ความร้อนในการบ่ม แข็งที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นทำการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) ในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ดังแสดงรูปที่ 3.5-3.12 ตามลำดับ



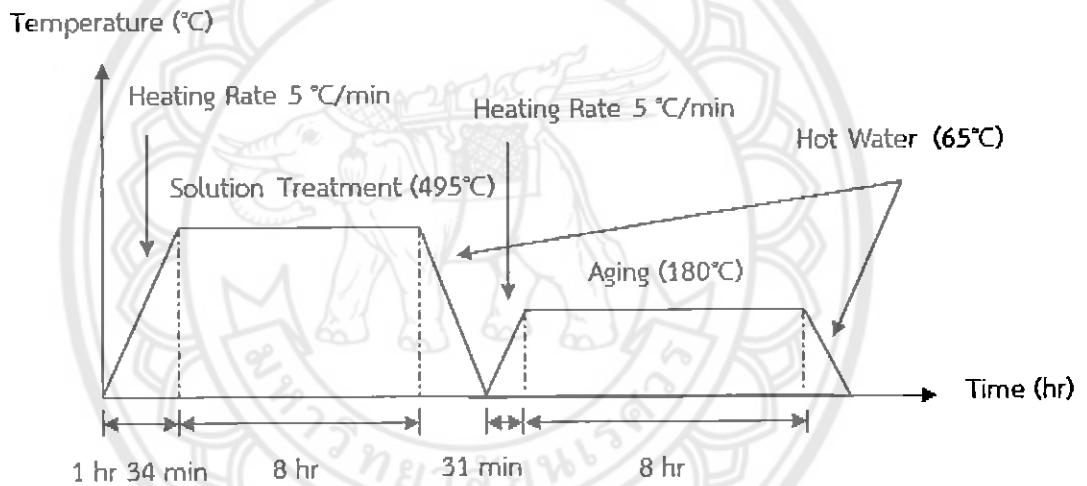
รูปที่ 3.5 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



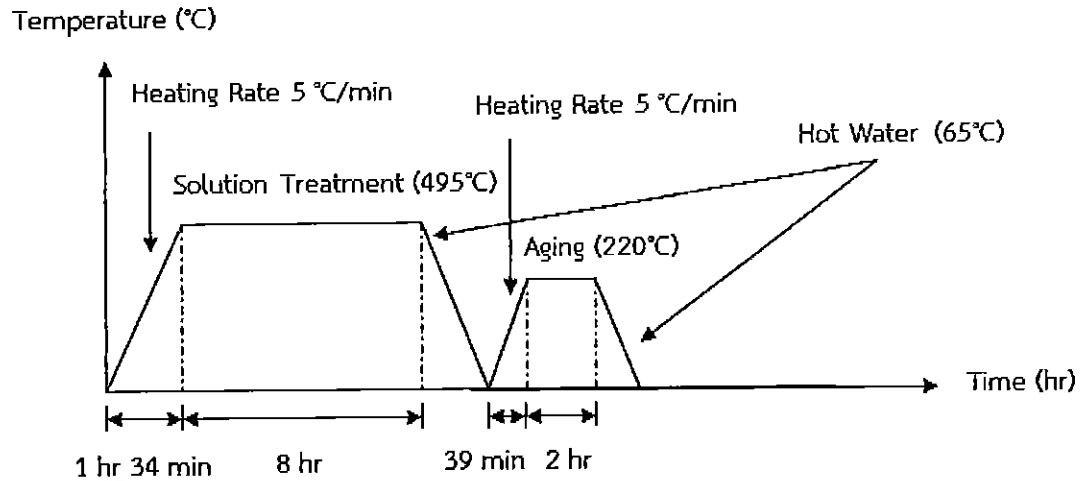
รูปที่ 3.6 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



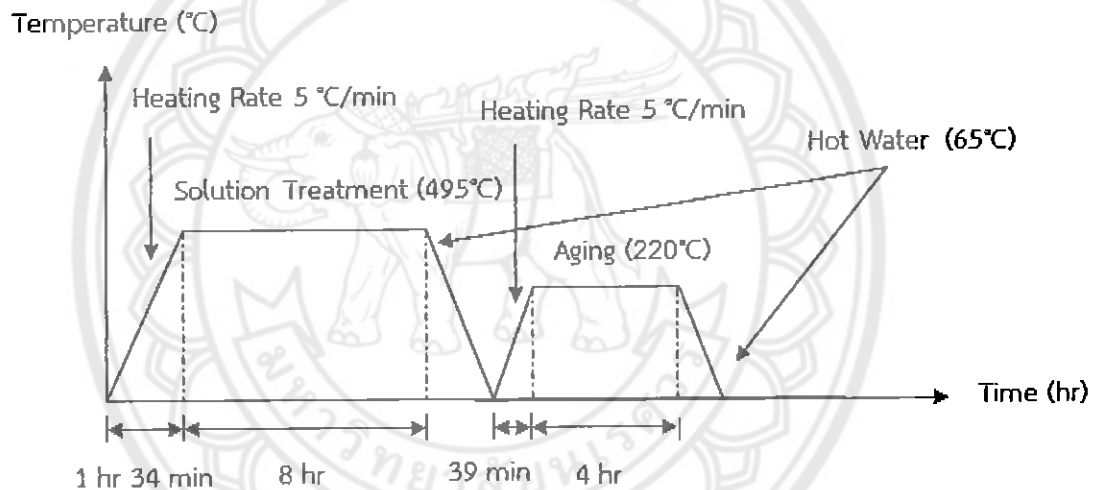
รูปที่ 3.7 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



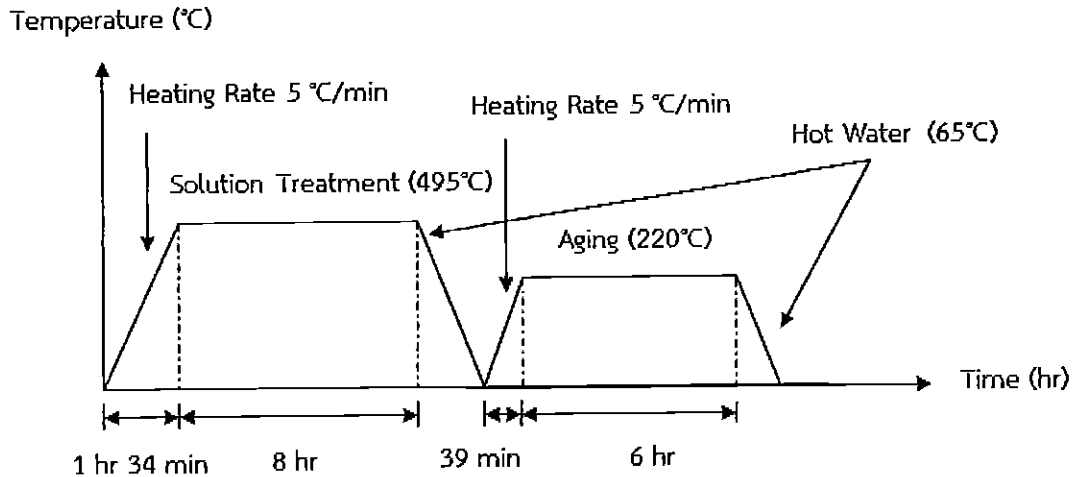
รูปที่ 3.8 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



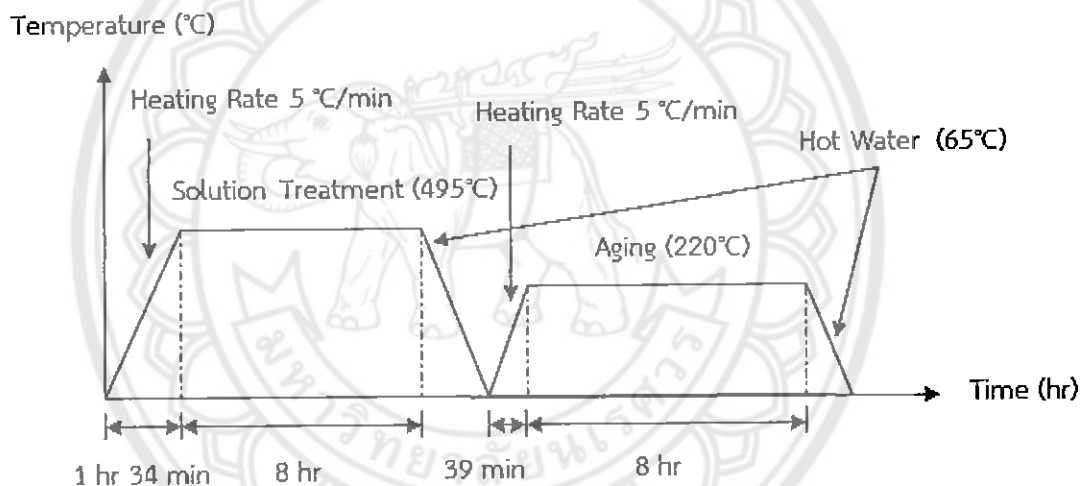
รูปที่ 3.9 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.10 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 3.11 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.12 การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope : OM)

3.3.4.1 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาขัดด้วยกระดาษทรายด้วยเบอร์ 180, 240, 320, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.3.4.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทราย มาขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ เพื่อลบรอยกระดาษทรายแล้วทำการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก

3.3.4.3 นำชิ้นงานที่ขัดมันแล้วมากัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ร้อยละ 0.5 ในน้ำกลั่น 99.5 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นเป่าให้แห้ง

3.3.4.4 นำชิ้นงานที่กัดกรดเรียบร้อยแล้วมาศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวมของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

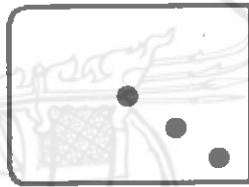
3.3.5 ทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความแข็ง

3.3.5.1 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาขัดด้วยกระดาษทรายด้วยเบอร์ 180, 240, 320, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.3.5.2 นำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล โดยใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ใช้น้ำหนักกด 187.5 กิโลกรัมแรง

3.3.5.3 ปล่อน้ำหนักแล้วจึงเริ่มจับเวลาหลังจากเข็มหยุดนิ่งเป็นเวลา 15 วินาที หลังจากนั้นหยุดการปล่อน้ำหนักทำอย่างนี้ไปจนครบ 3 จุดในแต่ละชิ้นงานทดสอบ

3.3.5.4 เมื่อทดสอบจำนวนแล้ว นำชิ้นงานไปวัดรอยกด นำมาคำนวณค่าความแข็ง คำนวณค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งชิ้นงาน 3 จุด ที่ใช้ทดสอบความแข็ง

3.3.6 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ที่มีอุณหภูมิอบละลาย 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และมีการบ่มแข็งในอุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาค ผลการทดสอบความแข็ง และทำการสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

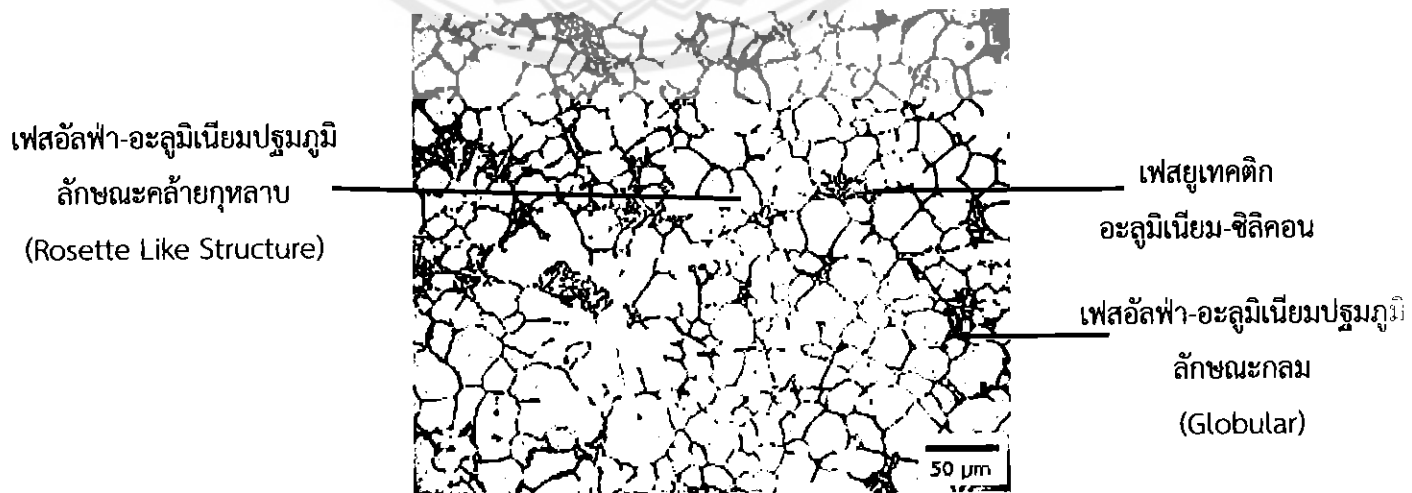
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองของชิ้นงานก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ดังรายการต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ในสภาพหล่อ

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 เทที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ผ่านรางเทเหล็กกล้าความชัน 45° ความยาว 30 เซนติเมตร เข้าสู่เครื่องฉีดแรงดันสูงที่มีความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ในสภาพหล่อ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) โดยโครงสร้างทั่วไปจะมีลักษณะกลม (Globular) และคล้ายกุหลาบ (Rosette-like structure) ในส่วนที่เป็นเฟสสีขาว และพบเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ในส่วนสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (I. J. Polmear, 1989) แสดงดังรูปที่ 4.1 จากการศึกษาสัดส่วนพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ที่ผ่านกระบวนการหล่อพบว่าได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 21.02 โดยพื้นที่



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคสภาพหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319

4.1.2 ผลทดสอบความแข็ง

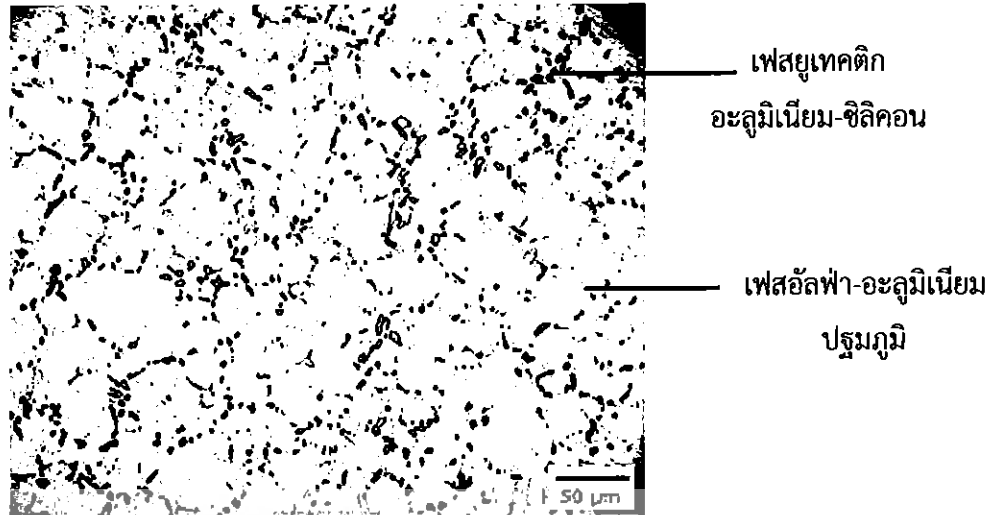
จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ในสภาพหล่อ ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) ในการวัดค่าความแข็งจะนำชิ้นงานแต่ละชิ้น มาทดสอบ 3 จุด แสดงตำแหน่งการทดสอบ ดังรูปที่ 3.11 โดยใช้หัวกดลูกบอลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักกด 62.5 กิโลกรัมแรง ใช้เวลากด 15 วินาทีต่อจุด พบว่าความแข็งของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 125.51 HB

4.2 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 หลังผ่านการอบละลาย

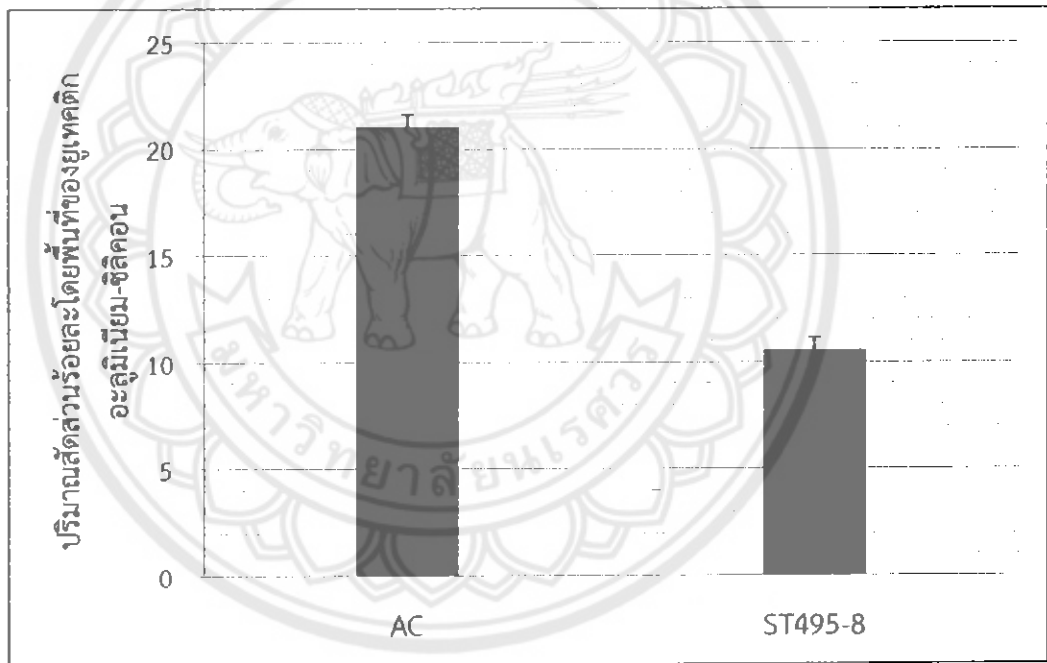
เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการหลอมมาทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ และหลังผ่านการอบละลาย แล้วนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จากเดิมที่มีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ขาวสลับดำเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างกลมมน และกระจายบนเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากในขั้นตอนการอบละลายส่งผลให้มีการแพร่ของอะตอมซิลิคอนออกจากเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยการละลายเข้าไปในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ทำให้เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกิดการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะกลมมนมากขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่สภาวะหล่อซึ่งเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นแท่งเรียวยาว แสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำมาหาค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ (Area fraction) พบว่าเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย มีค่าสัดส่วนโดยพื้นที่เฉลี่ยร้อยละ 10.54 โดยพื้นที่ และชิ้นงานที่สภาวะหล้อมีค่าสัดส่วนโดยพื้นที่เฉลี่ยร้อยละ 21.02 โดยพื้นที่ เมื่อนำสัดส่วนโดยพื้นที่ยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ จะพบว่าชิ้นงานสภาพหล่อที่ผ่านการอบละลายจะมีค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกต่ำลง แสดงดังรูปที่ 4.3 (I.J. Polmear, 1989)



รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 หลังผ่านการละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนในสภาวะหล่อ และ หลังการอบละลาย

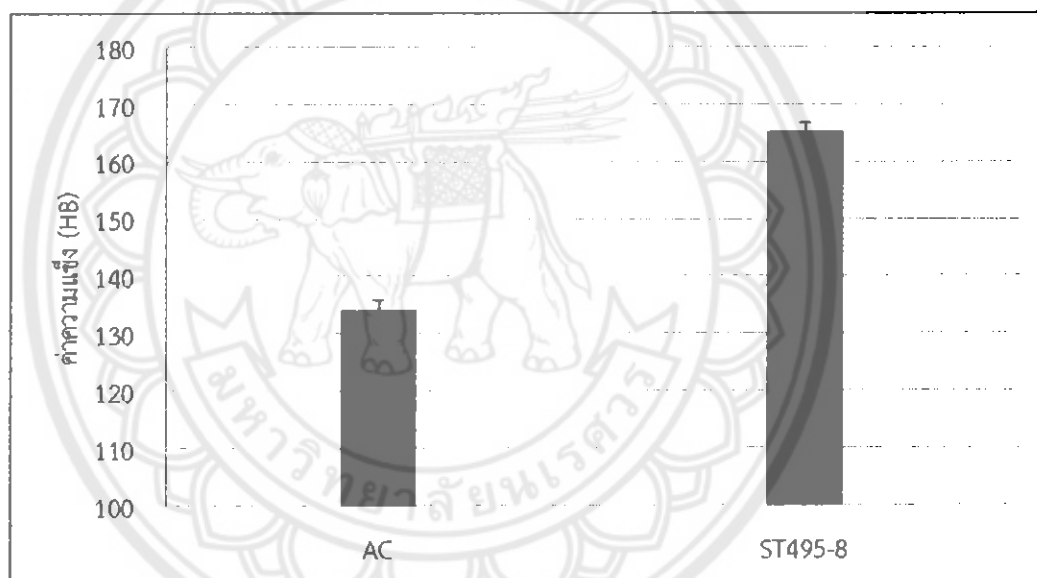
หมายเหตุ:

AC = สภาวะหล่อ

ST495-8 = การอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

4.2.2 ผลการทดสอบความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานในสภาพหล่อมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 134.28 HB และหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 165.38 HB เมื่อเปรียบเทียบความแข็งระหว่างชิ้นงานในสภาพหล่อกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย ทำให้ทราบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายมีค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.4 เนื่องจากหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในขั้นตอนการอบละลายส่งผลให้มีการแพร่ของอะตอมซิลิคอนออกจากเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยการละลายเข้าไปในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ อะตอมของซิลิคอนถือเป็นสิ่งแปลกปลอมเมื่ออยู่ในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ทำให้การเรียงตัวของอะตอมอะลูมิเนียมบิดเบี้ยวไปจากที่ควรจึงก่อให้เกิดความเครียด และส่งผลให้ชิ้นงานมีแรงต้านทานต่อแรงทางกลที่มากกระทำได้มากขึ้น จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายจะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงานในสภาพหล่อ



รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังผ่านการอบละลาย

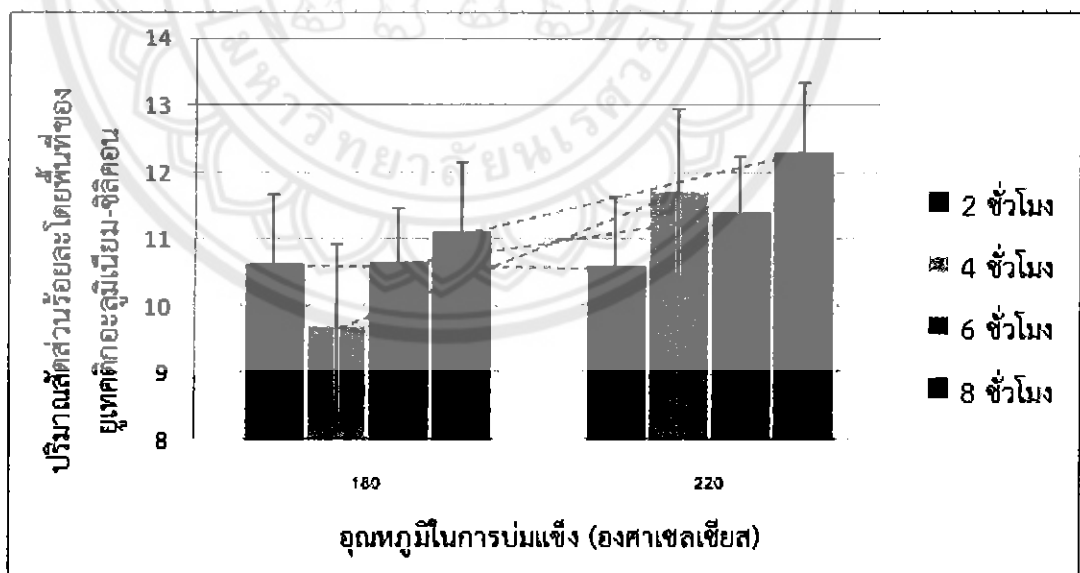
4.3 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 หลังการบ่มแข็ง

เมื่อนำชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชุบน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในน้ำอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังนี้

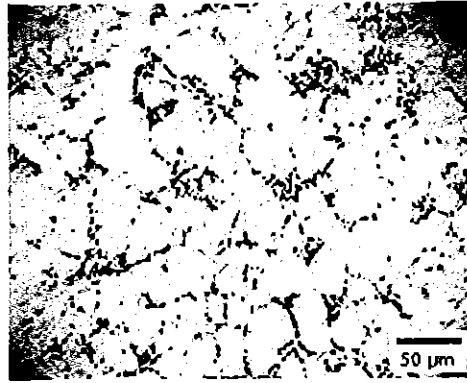
4.3.1 ผลการศึกษาการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส

4.3.1.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

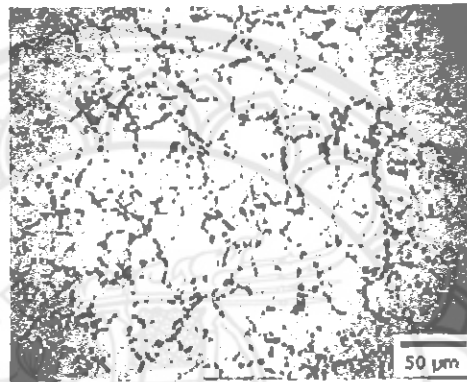
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 เห็นได้ว่าทุกสภาวะมีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกัน คืออยู่เขตติกออะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีโครงสร้างกลมมนกระจายอยู่บนพื้นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 แต่สภาวะบ่มแข็งจะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการตกตะกอนของอนุภาคซิลิคอนที่เกิดขึ้นในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจึงไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Mitsuda et al., 2011) และจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบว่าเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส มีการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมากกว่าในชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบในช่วงเวลาเดียวกัน เนื่องจาก ในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิที่สูงกว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้มีพลังงานที่กระตุ้นมากพอที่จะเกิดเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนจึงทำให้ ในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส มีการกระจายตัวที่ดี (แม้น และสมชัย, 2544) เมื่อทำการหาปริมาณสัดส่วนโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่าปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส มีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมากกว่าหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบในช่วงเวลาเดียวกัน



รูปที่ 4.5 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในสภาวะบ่มแข็งที่ค่าอุณหภูมิแตกต่างกัน แต่ในช่วงค่าเวลาเดียวกัน



ก)

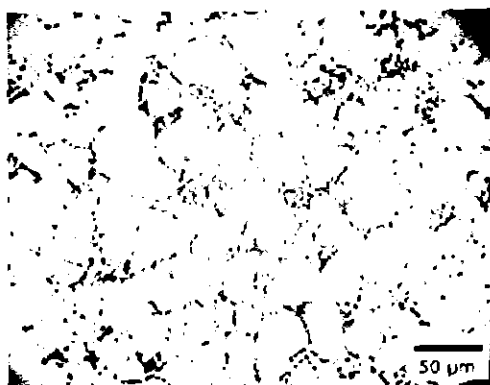


ข)

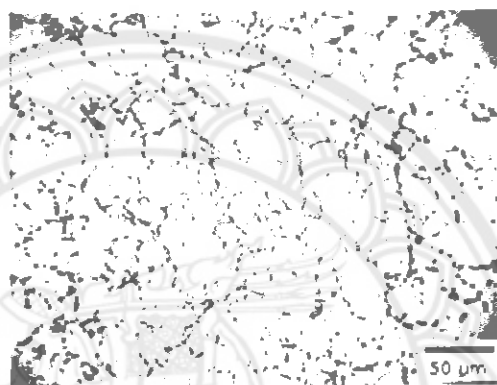
รูปที่ 4.6 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ก) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ข) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ก)



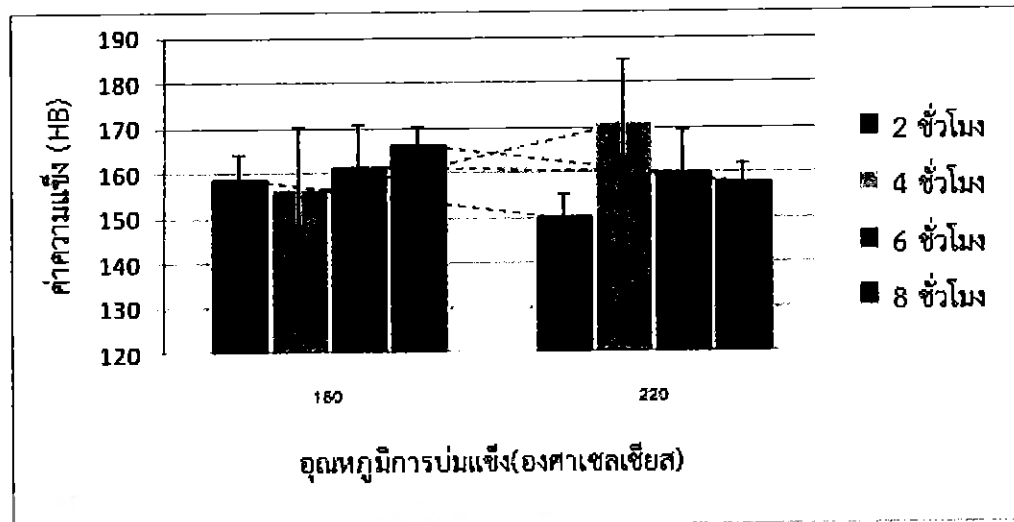
ข)

รูปที่ 4.7 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

- ก) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- ข) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4.3.1.2 ผลการทดสอบความแข็ง

จากการศึกษาการทดสอบความแข็งพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งในช่วงเวลา 2, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งที่สูงกว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนน้อยกว่าในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ในเวลาที่เท่ากัน แสดงดังรูปที่ 4.5 จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคซิลิคอนที่มีปริมาณมากในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีค่าความแข็งสูงกว่า ในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส (แมน และสมชัย, 2544) ซึ่งจะแตกต่างกับการบ่มแข็งในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่มีปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มากกว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อาจวัดเจอเฟสที่มีความแข็งสูงกว่า

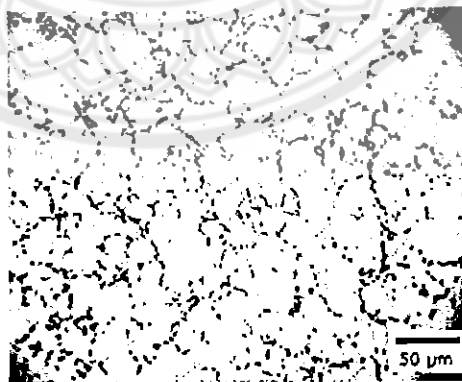


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งที่ค่าอุณหภูมิแตกต่างกัน แต่ในช่วงค่าเวลาเดียวกัน

4.3.2 ผลการศึกษาการบ่มแข็งในช่วงค่าเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง

4.3.2.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

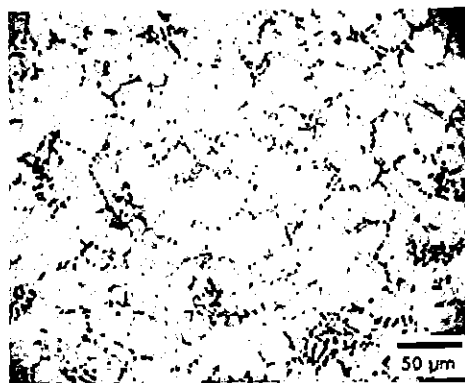
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิเดียวกัน ในช่วงเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง พบว่าในช่วงเวลาที่ 8 ชั่วโมง มีรวมตัวกันของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เนื่องจากเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จะค่อยๆ เกิดการรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มเกิดเป็นเฟสที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.9 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งมาหาปริมาณสัดส่วนโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่าในการบ่มแข็ง ในช่วงเวลาที่ 8 ชั่วโมง มีปริมาณที่มากที่สุด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับในช่วงเวลาที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.10



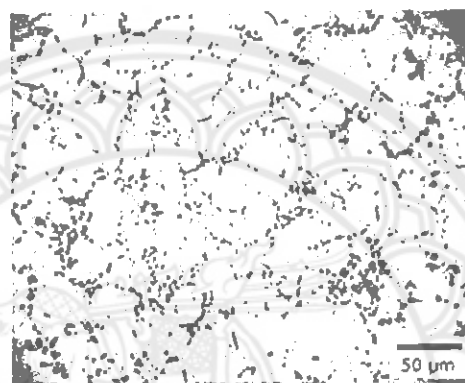
ก)

รูปที่ 4.9 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

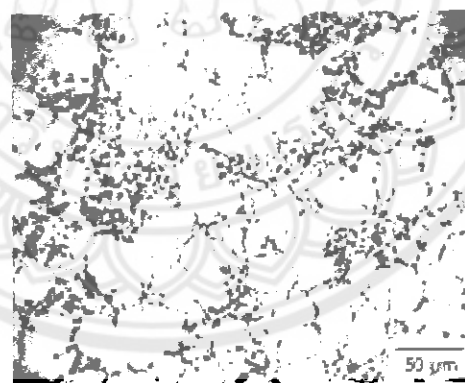
ก) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ข)



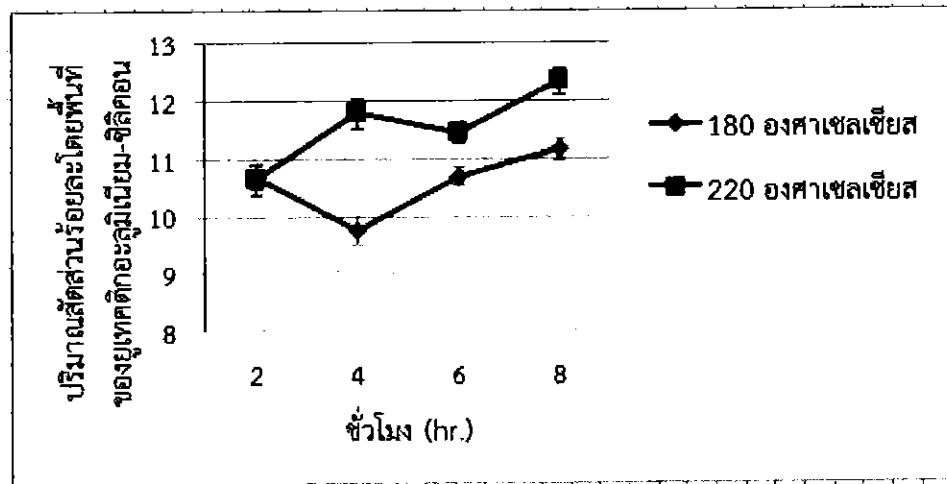
ค)



ง)

รูปที่ 4.9 (ต่อ) ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

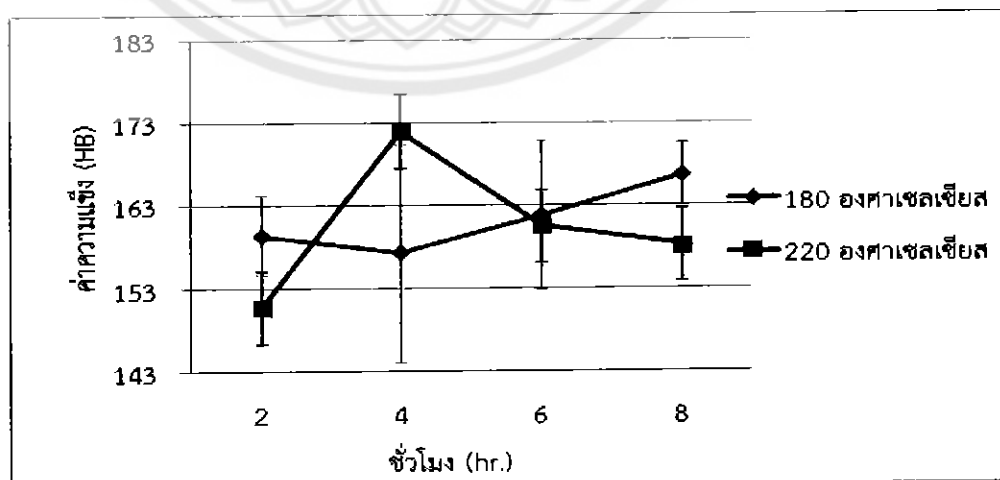
- ข) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- ค) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- ง) ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในสภาวะบ่มแข็งในช่วงค่าเวลาต่างกัน ที่ค่าอุณหภูมิเดียวกัน

4.3.2.2 ผลการทดสอบความแข็ง

จากการศึกษาชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าค่าความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเวลาในการบ่มแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าสอดคล้องกับทฤษฎีการบ่มแข็งคือ เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งก็จะช่วยเพิ่มความสามารถในการแพร่ของอนุภาคซิลิคอนให้ตกตะกอนลงบนเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิจึงทำให้มีค่าความแข็งสูงขึ้น (แมน และสมชัย, 2544) และในชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง พบว่าผลการทดสอบในช่วงเวลาที่ 2 ถึง 4 ชั่วโมง มีการเพิ่มของความแข็ง แต่เมื่อผ่านช่วงเวลาที่ 4 ชั่วโมง ค่าความแข็งลดลงเนื่องจากระยะเวลาในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิด Overaged ส่งผลให้มีค่าความแข็งลดลง (แมน และสมชัย, 2544) แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งในสภาวะบ่มแข็งในช่วงค่าเวลาต่างกัน ที่ค่าอุณหภูมิเดียวกัน

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของโครงการ

5.1.1 ชิ้นงานในสภาพหล่อ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (α -Al) โดยโครงสร้างทั่วไปมีลักษณะกลม (Globular) และคล้ายกุหลาบ (Rosette-like structure) และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีลักษณะชั้นๆ สีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 134.28 HB และการนั้บร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่ามีปริมาณค่าเฉลี่ยของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนร้อยละ 21.03 โดยพื้นที่ของชิ้นงานในสภาพหล่อ

5.1.2 ชิ้นงานหลังผ่านขั้นตอนการอบละลาย โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (α -Al) และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเป็นมีลักษณะชั้นๆ สีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิเปลี่ยนไปเป็นลักษณะกลมมนมากขึ้น และค่าความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 165.38 HB การนั้บร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่าปริมาณค่าเฉลี่ยของเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนร้อยละ 10.54 โดยพื้นที่ของชิ้นงานหลังการอบละลาย

5.1.3 ชิ้นงานหลังผ่านขั้นตอนการบ่มแข็ง พบว่าทุกสภาวะมีโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกันกับขั้นตอนการอบละลาย การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ซึ่งความแข็งหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 166.76 HB และการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ซึ่งความแข็งหลังผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 171.96 HB เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของเฟสซิลิคอนมีปริมาณมาก และพบว่าเมื่ออุณหภูมิการบ่มแข็งที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีพลังงานกระตุ้นมากพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสซิลิคอน และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เฟสซิลิคอนค่อยๆ รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ และจะทำให้ค่าความแข็งลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล สามารถเลือกชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบอื่นๆ มาศึกษา และเปรียบเทียบผลกรรมวิธีทางความร้อนได้

5.2.2 ขั้นตอนการบ่มแข็งสามารถศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอุณหภูมิ และเวลาที่ทำให้ค่าความแข็งมีค่าสูงสุด

5.2.3 เมื่อนำชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อนมาเปรียบเทียบกัน พบว่าไม่สามารถวัดอนุภาคของซิลิคอนที่เกิดจากการตกตะกอนขึ้นหลังจากการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เนื่องจากอนุภาคของซิลิคอนในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ (α -Al) มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ดังนั้นควรมีการศึกษาอนุภาคของซิลิคอนที่เกิดการตกตะกอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 การใช้เตาอบที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตา อาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานเกิดอันตรายได้ ฉะนั้นเราจึงควรใส่อุปกรณ์ที่ป้องกันความร้อนทุกครั้ง

5.3.2 การตัดชิ้นงาน ควรยึดชิ้นงานให้แน่น ก่อนทำการตัด เพราะถ้าชิ้นงานหลุด หรือขยับตัว จะทำให้ใบมีดตัดแตกหัก และอาจเกิดอันตรายต่อปฏิบัติงานได้

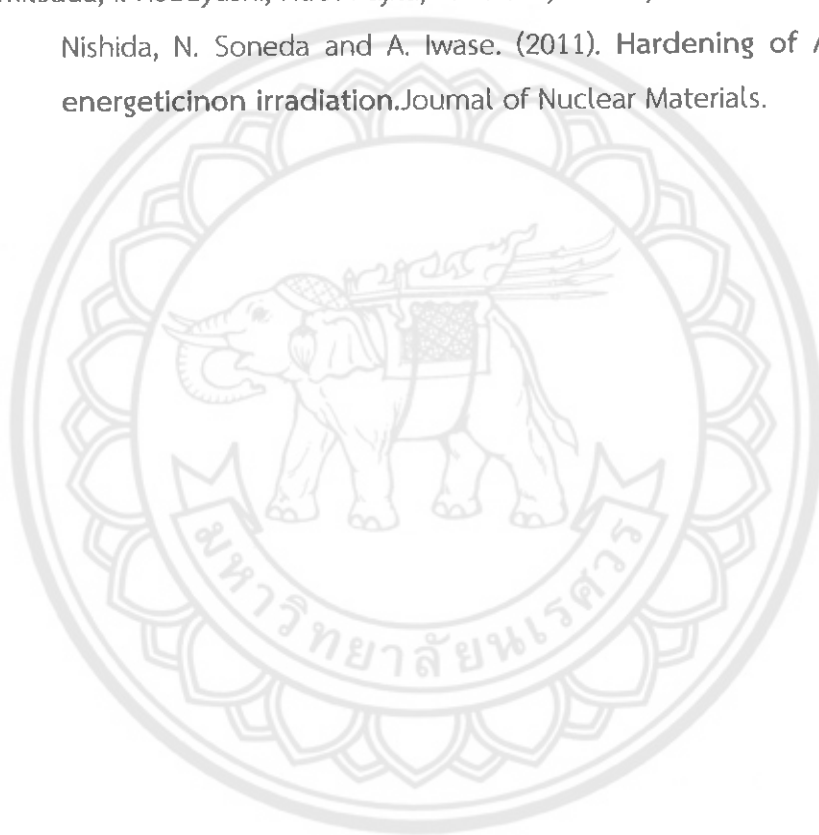


เอกสารอ้างอิง

- ชาวลิต ลีมนณีวิจิตร. (2547-2551). โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรดไฮเปอร์ยูเทคติก. เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
- ฐาปนีย์ อุดมผล. (2554). การทดสอบความแข็ง. สืบค้นเมื่อ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2555, จาก http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/1_2552Mech%20met%20lab%20PDF/Mech%20met%20handout-Th/Lab_2Hardness_th.pdf
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2553). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น
- พยุร เกตุกราย. (2523). การหล่อโลหะ ภาคการผลิต. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- มานพ ดันตระบัดชิตย์. (2535). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- แมน อมรสิทธิ์. (2547). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แมคกรอฮิล อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์
- แมน อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2544). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ
- วิรุจน์ บัวงาม. (2553). เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏ อุบลราชธานี. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2555, จาก <http://learners.in.th/blog/wirut/325228>
- วีระชัย ลามอ. (2550). ความแข็ง (Hardness). สืบค้นเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2555, จาก www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_5_2550_hardness.pdf
- E. Cerri , E. Evangelista , S. Spigarelli, P. Cavaliere, F. DeRiccardis. Effects of thermal treatments on microstructure and mechanical properties in a thixocast 319 aluminum alloys (2000) 254–260
- E. Sjölander, S. Seifeddine. Artificial ageing of Al–Si–Cu–Mg casting alloys (2011) 7402– 7409
- Emma Sjölander, S. Seifeddine. The heat treatment of Al–Si–Cu–Mg casting alloys (2010) 1249–1259
- I. J. Polmear. (1989). Light alloys metallurgy of the light metals. London: E. Arnold.
- J. Pearce. (2548). การอบชุบสำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อ. วารสารหล่อโลหะ.
- M. Tash, F.H. Samuel F. Mucciardi, H.W. Doty. Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys (2007) 185–201

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- O. El Sebaie , A.M. Samuel , F.H. Samuel , H.W. Doty. The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si casting alloys (2008) 241-252
- 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. Kaneo, K. Nishida, N. Soneda and A. Iwase. (2011). Hardening of Al-Cu-Mg Alloy by energetic neutron irradiation. Journal of Nuclear Materials.

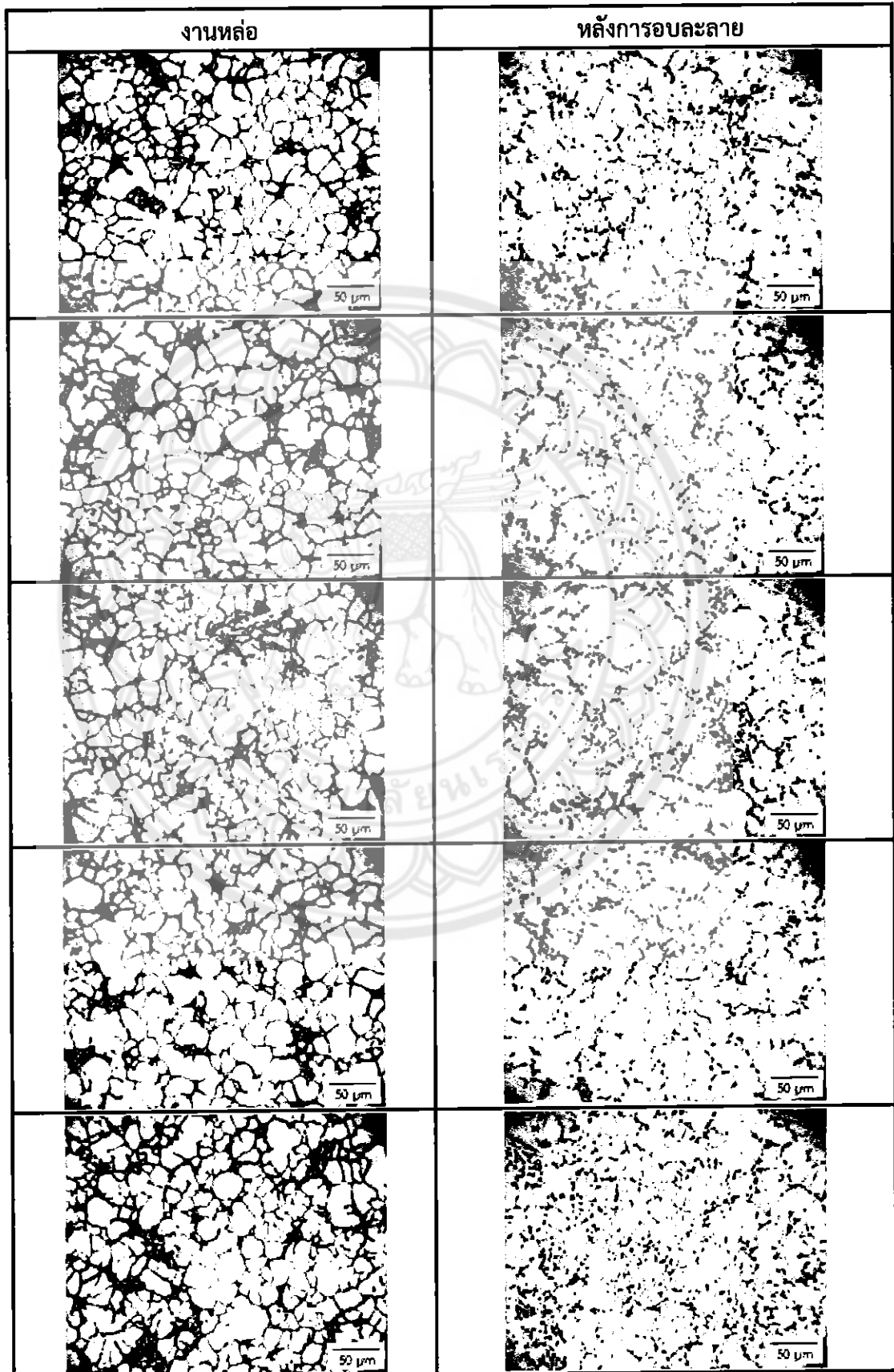




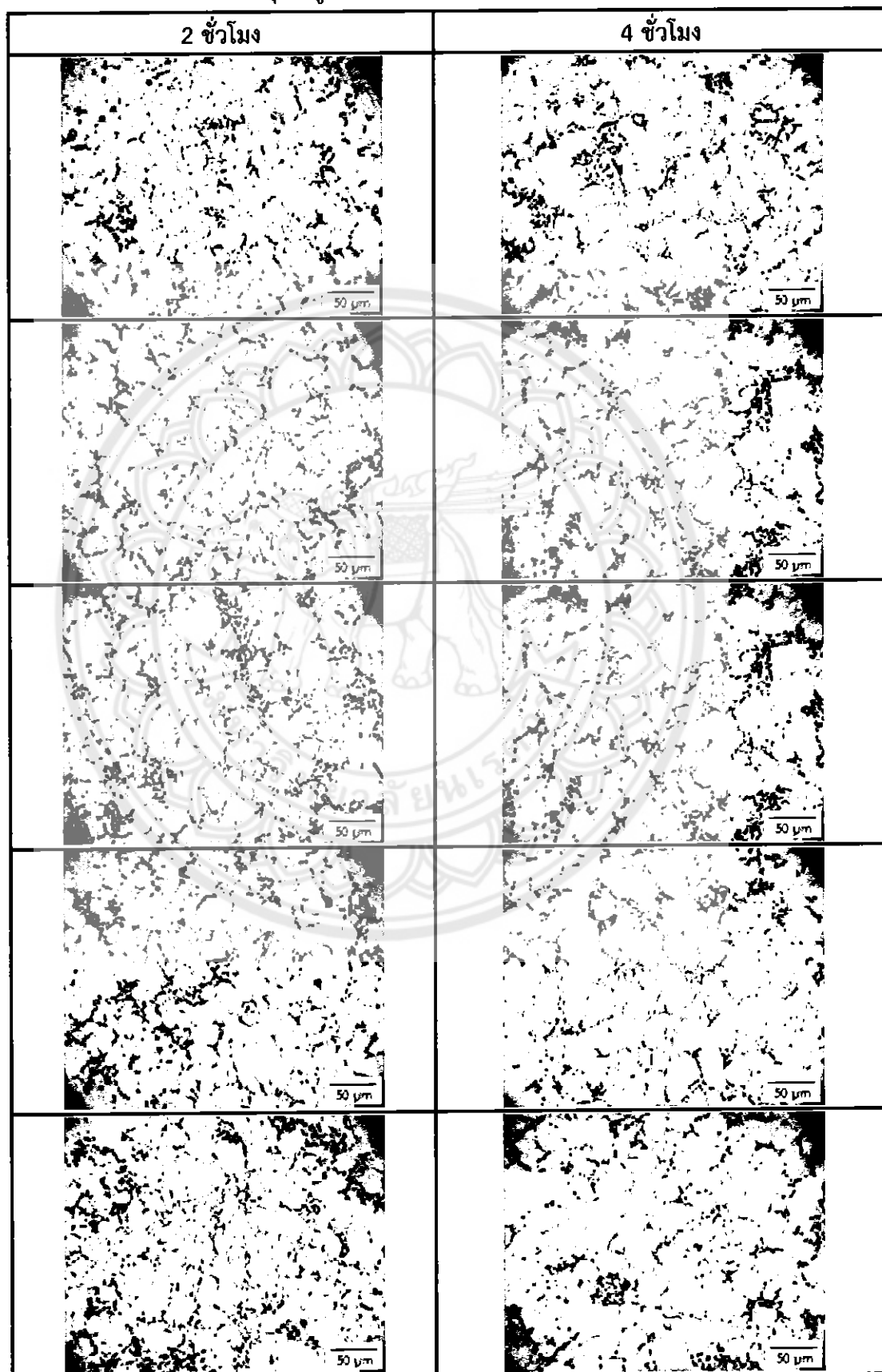
ภาคผนวก ก

โครงสร้างจุดภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน
ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

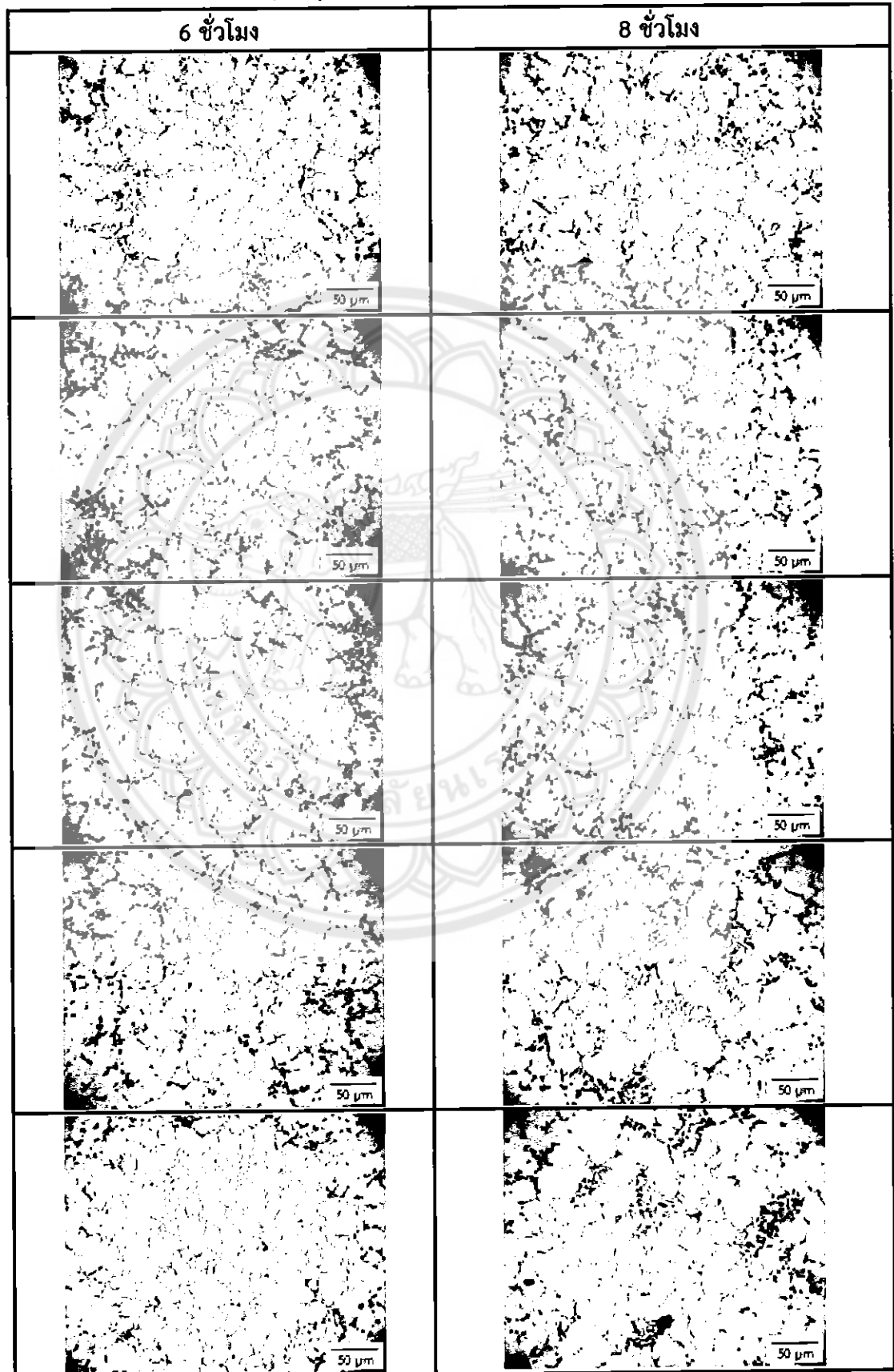
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสภาวะงานหล่อ และชิ้นงานสภาวะหลังการอบที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



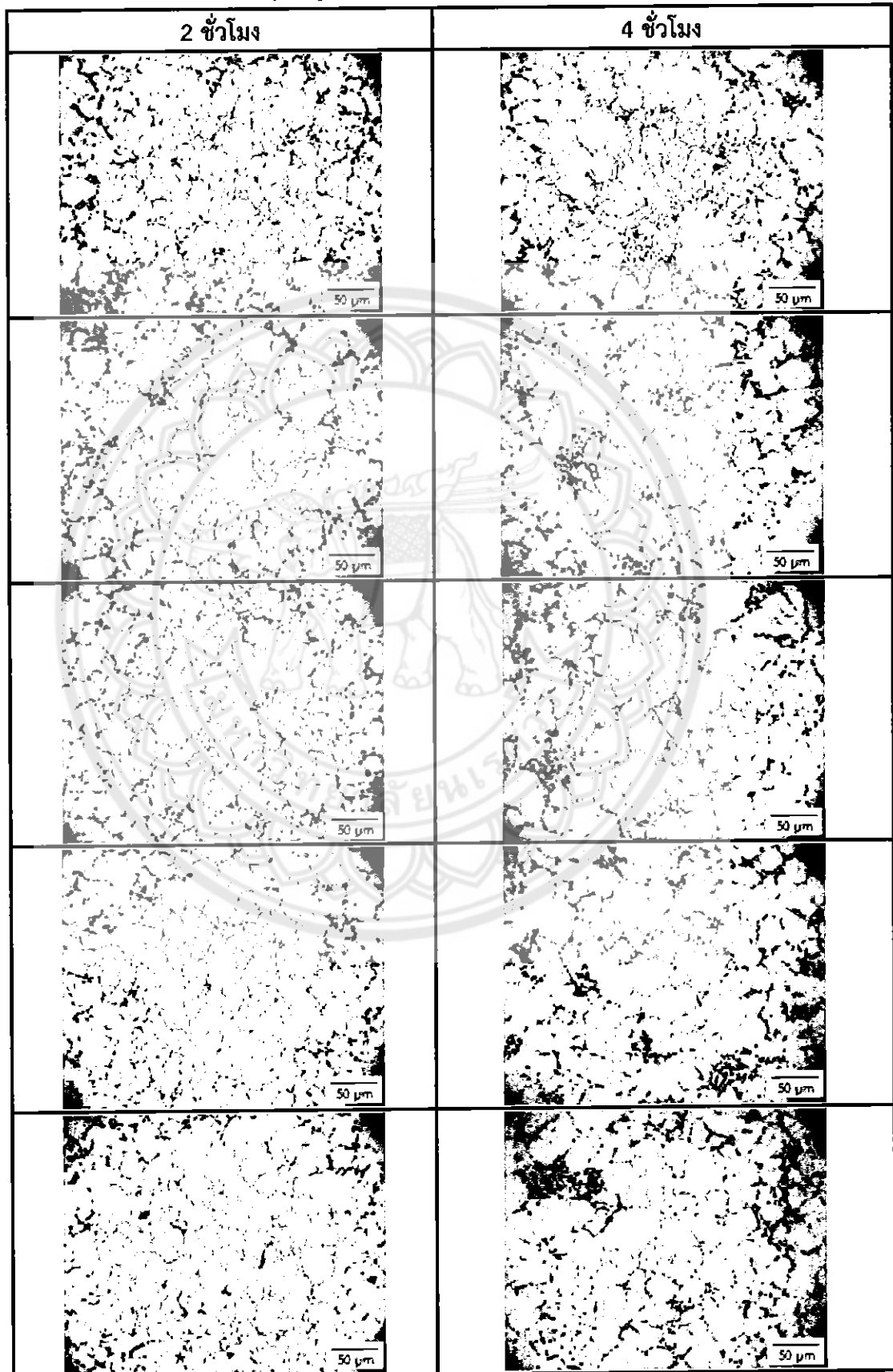
ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



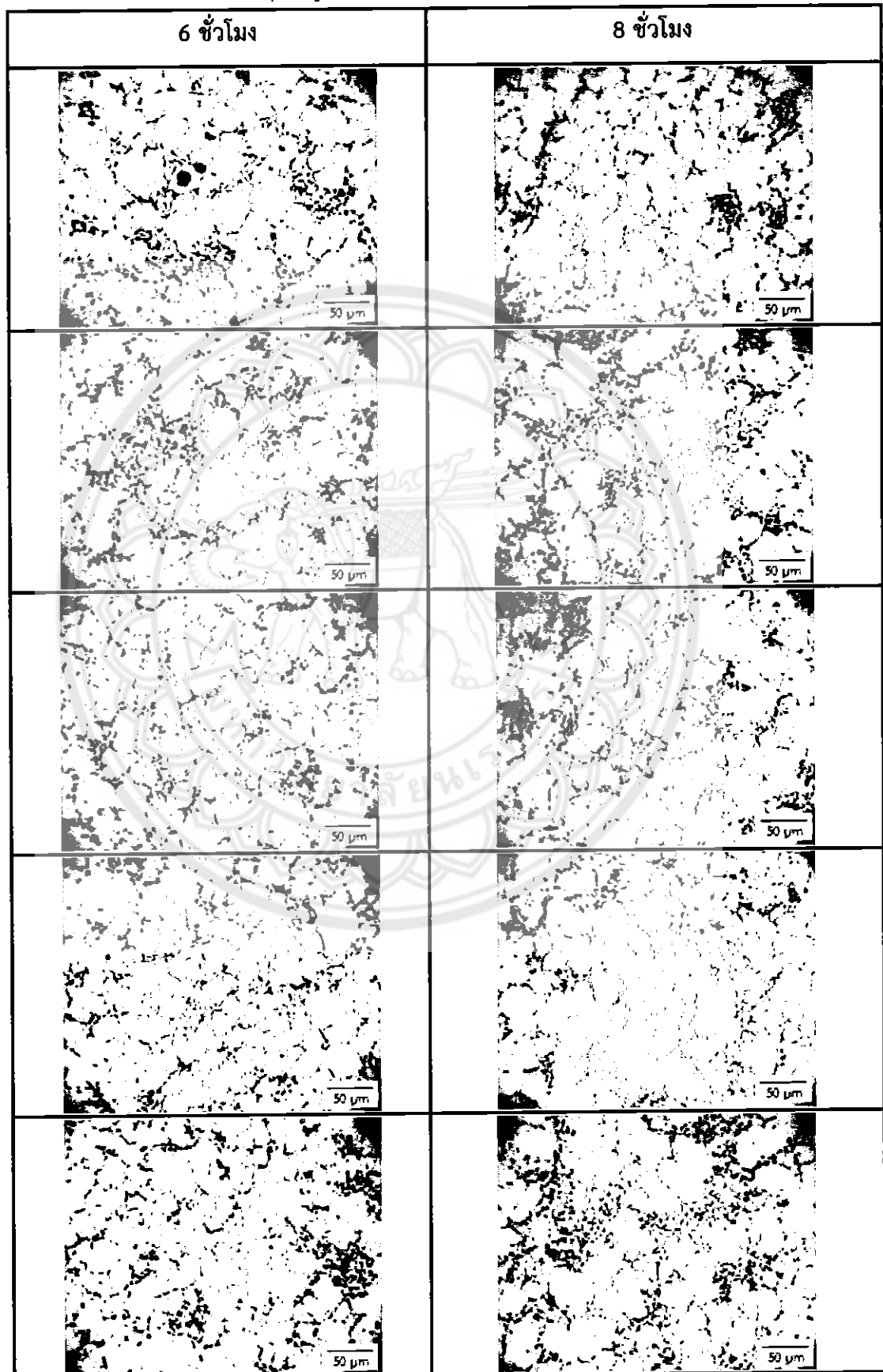
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง แล้วทำให้เป็นตัวอย่าง รวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

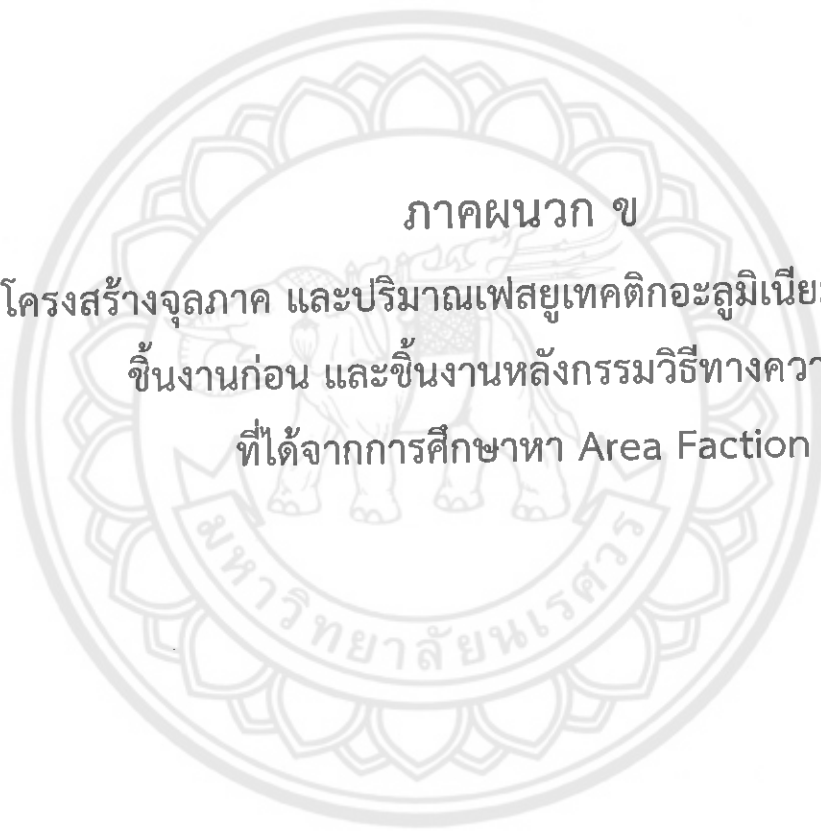


ตารางที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสภาวะผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



ภาคผนวก ข

โครงสร้างจุลภาค และปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของ
ชิ้นงานก่อน และชิ้นงานหลังกรรมวิธีทางความร้อน
ที่ได้จากการศึกษาหา Area Fraction



ตารางที่ ข.1 ปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน (ร้อยละโดยพื้นที่)

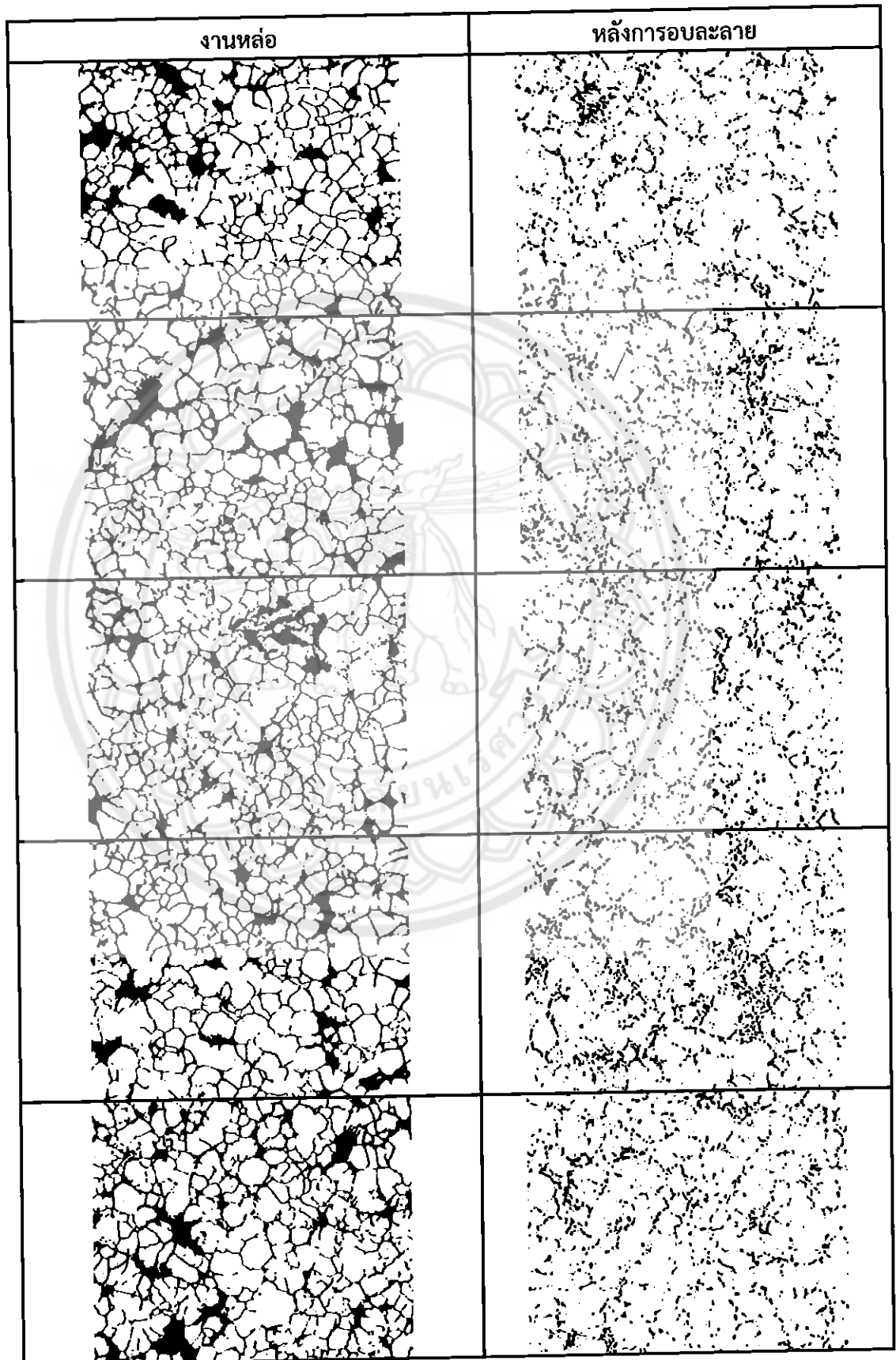
สภาวะ ชิ้นงาน	AC	ST 495-8	Ag 220-2	Ag 220-4	Ag 220-6	Ag 220-8	Ag 180-2	Ag 180-4	Ag 180-6	Ag 180-8
1	21.24	10.08	13.40	12.60	10.79	11.82	9.21	11.45	10.89	11.78
2	20.34	10.66	10.48	10.95	11.07	13.93	9.54	9.87	12.80	11.28
3	18.78	10.02	9.49	11.16	11.16	12.52	11.93	10.13	10.61	10.77
4	18.58	11.43	9.49	11.41	10.51	11.70	10.96	8.52	10.28	11.58
5	24.03	9.86	10.68	11.04	11.39	14.45	12.20	8.54	10.74	9.54
6	20.72	11.05	11.65	10.79	12.13	12.22	10.90	11.79	10.63	10.71
7	18.32	11.15	9.76	10.11	11.46	11.91	9.57	9.57	10.48	10.96
8	27.44	10.58	9.48	11.66	11.30	10.86	10.12	8.40	10.13	9.90
9	20.81	10.76	11.23	13.52	13.39	12.67	10.95	9.01	9.93	12.61
10	19.95	9.78	10.64	14.50	11.23	11.36	11.28	10.12	10.44	12.42
ค่าเฉลี่ย	21.02	10.54	10.63	11.77	11.44	12.34	10.67	9.74	10.69	11.15
SD	2.79	0.57	1.23	1.36	0.80	1.11	1.02	1.18	0.79	0.99
Error bar	0.55	0.11	0.24	0.27	0.16	0.22	0.20	0.23	0.15	0.19

หมายเหตุ: AC = สภาวะหล่อ

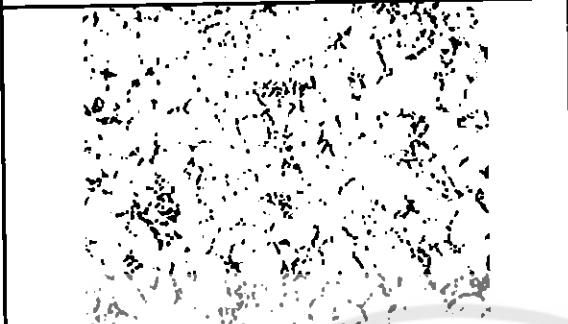
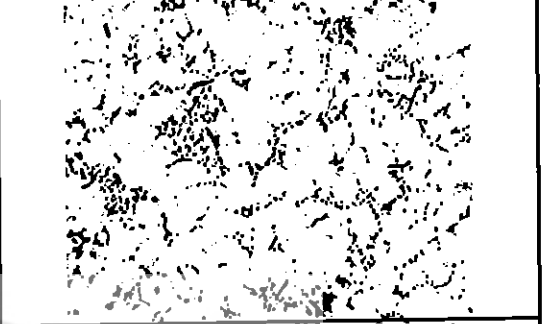
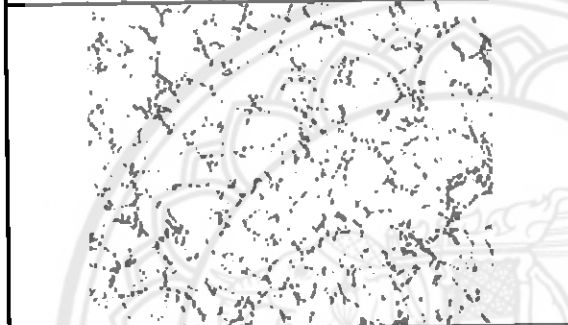
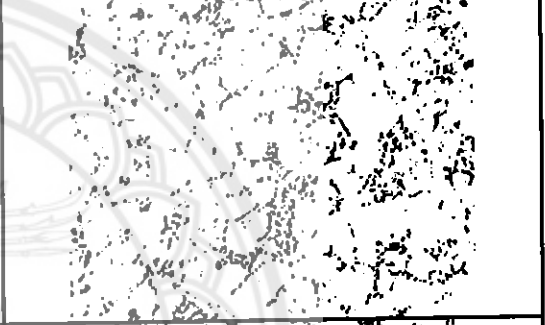
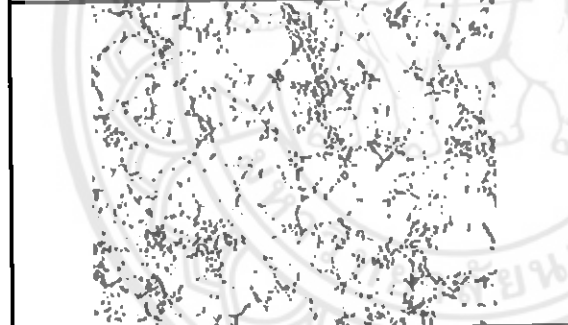
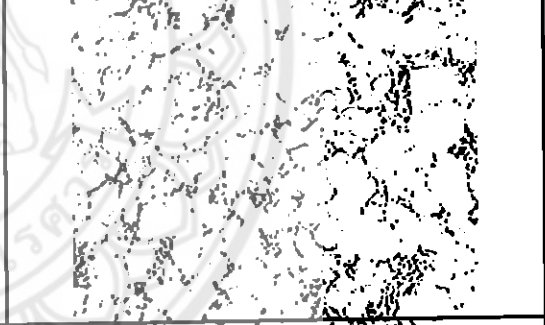
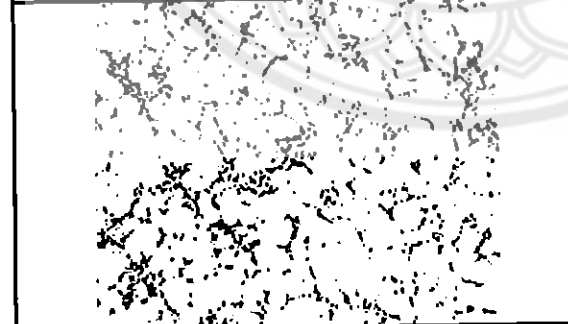
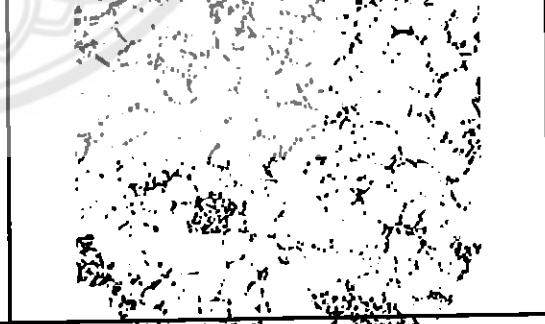
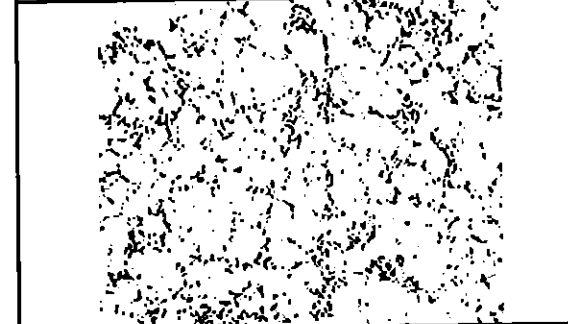
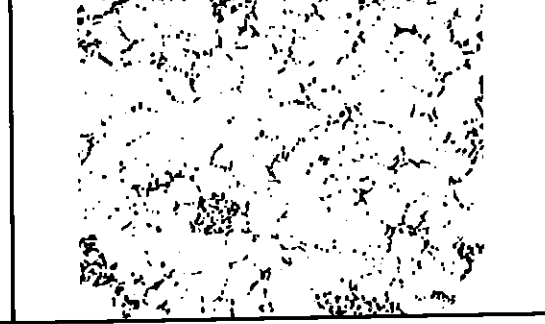
ST495-8 = อบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

Ag180-2 = อบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

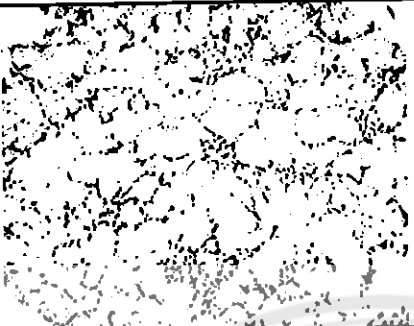
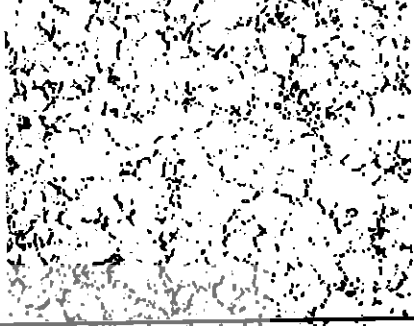
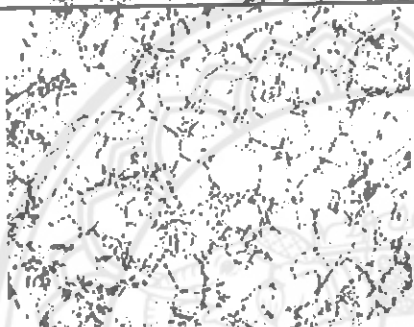
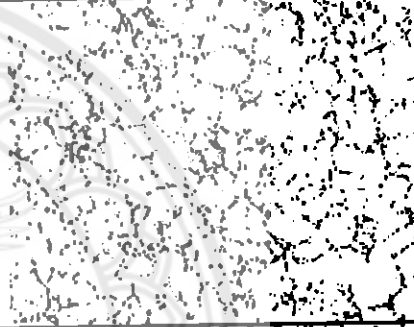
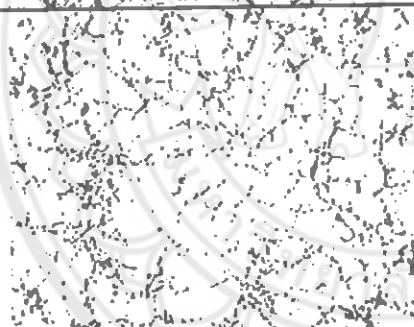
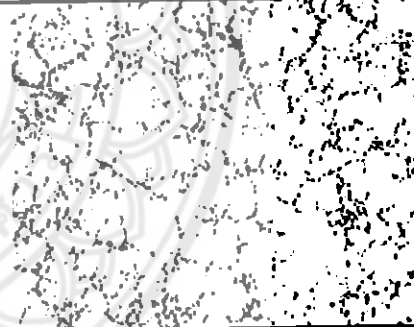
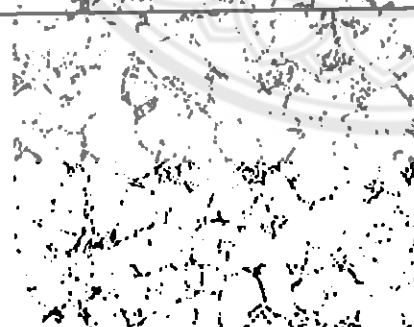
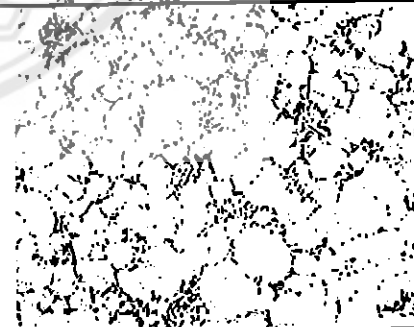
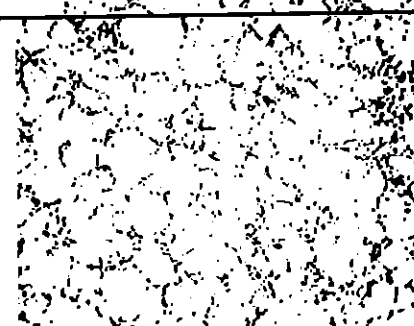
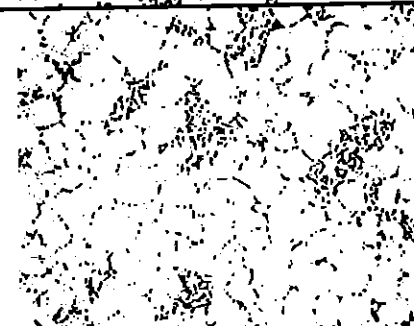
ตารางที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานสภาวะงานหล่อ และชิ้นงานสภาวะหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



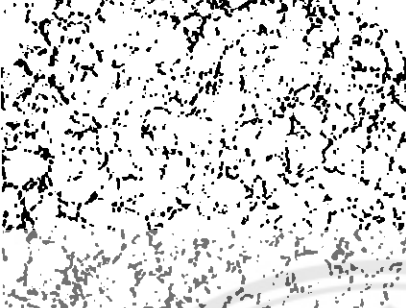
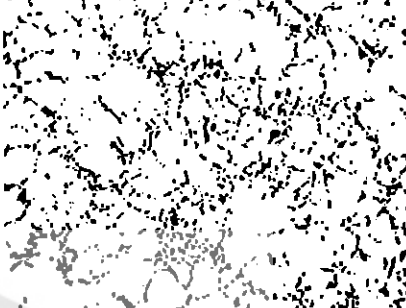
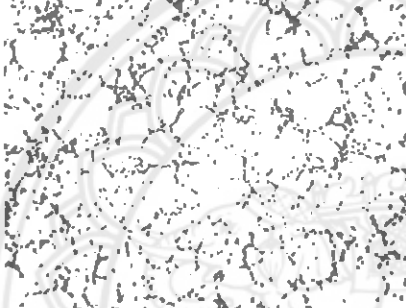
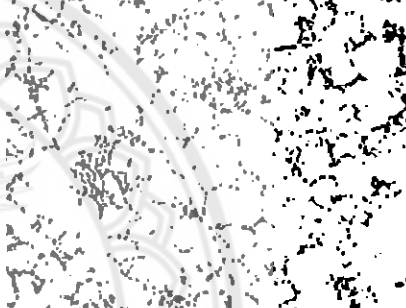
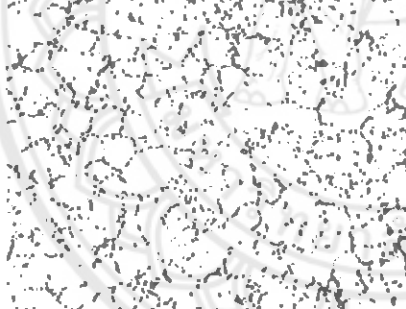
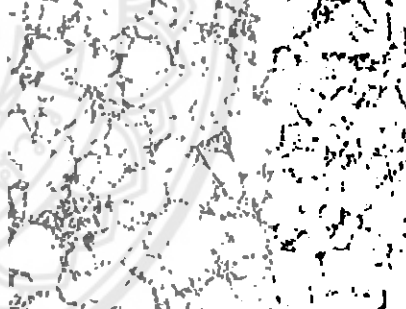
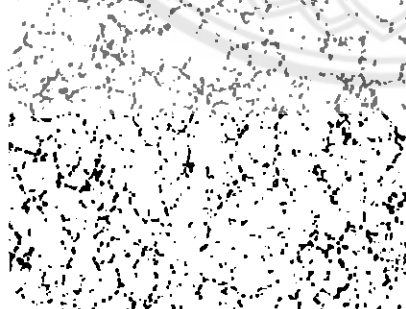
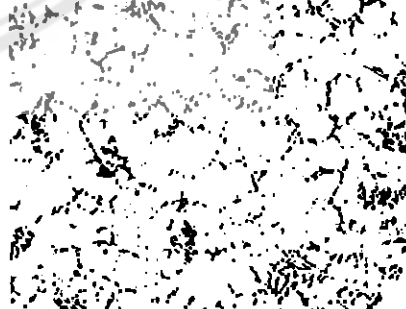
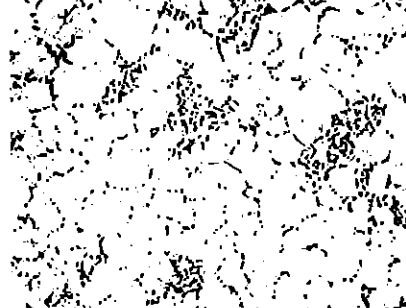
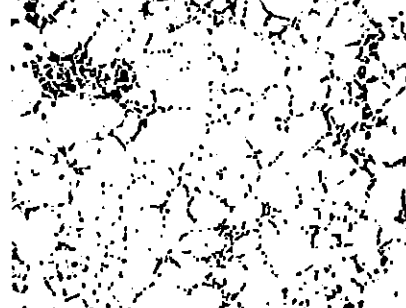
ตารางที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานสภาวะผ่านการ
 อบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส
 ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
	
	
	
	
	

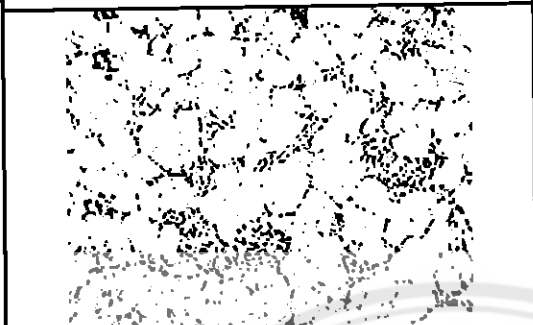
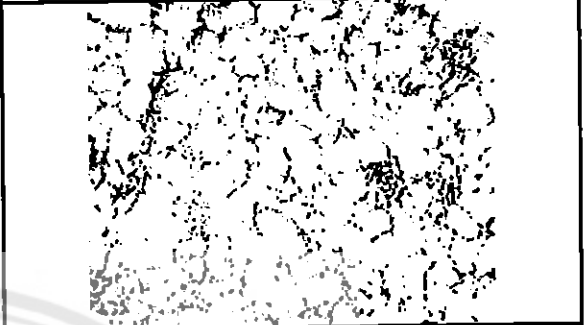
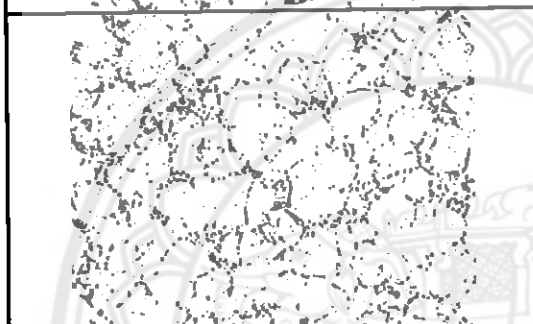
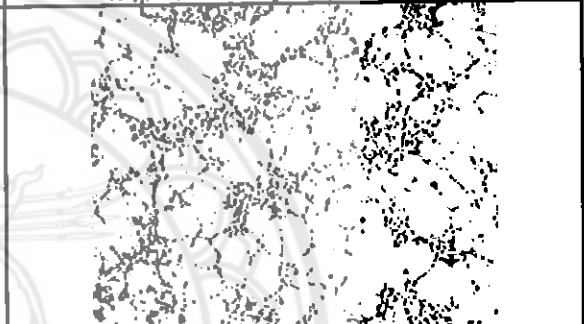
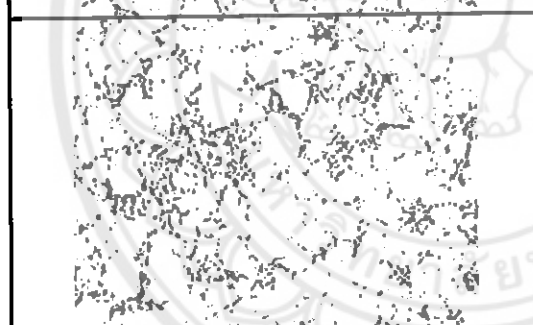
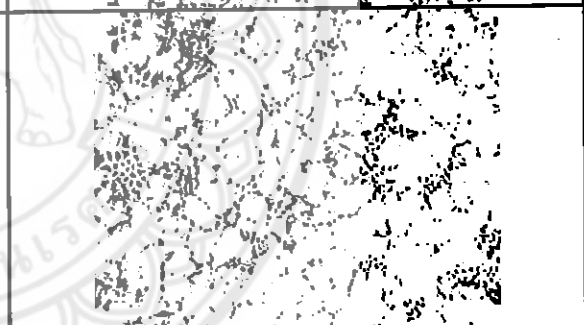
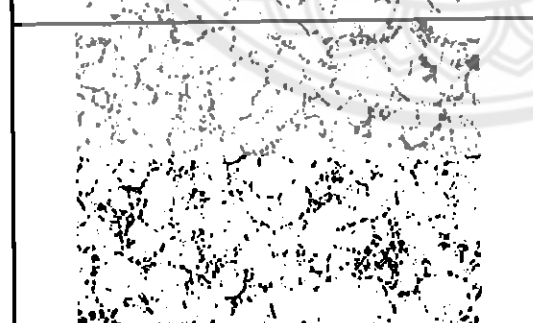
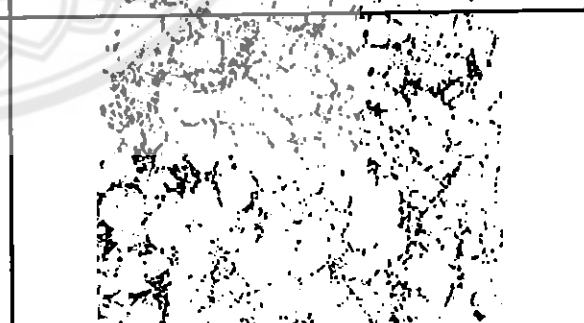
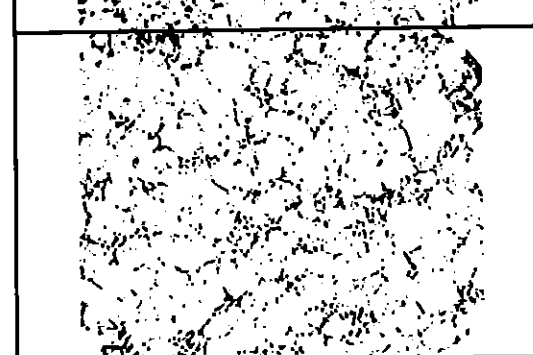
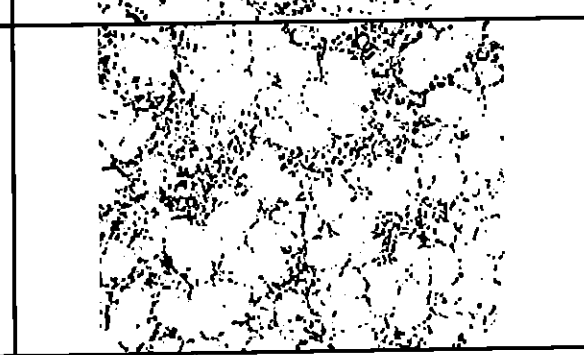
ตารางที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานสภาวะผ่านการ
 อบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียสและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส
 ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

6 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
	
	
	
	
	

ตารางที่ ข.5 โครงสร้างจุลภาคปริมาณเพสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนของชิ้นงานสภาวะผ่านการ
 อบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส
 ที่ 2 และ 4 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง
	
	
	
	
	

ตารางที่ ข.6 โครงสร้างจุลภาคปริมาณเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนของชิ้นงานสถานะผ่านการ
 อบละลายที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส
 ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

6 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
	
	
	
	
	



ภาคผนวก ค

สมบัติทางกลของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน

จำนวนชิ้นงาน สภาวะต่างๆ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าความ คลาดเคลื่อน
AC	130.35	142.79	129.71	134.28	7.36	1.47
ST495-8	165.34	161.74	169.05	165.38	3.65	0.73
Ag180-2	166.37	159.88	152.04	159.43	7.17	1.43
Ag180-4	170.43	134.51	166.78	157.24	19.77	3.95
Ag180-6	146.37	168.58	170.47	161.81	13.39	2.68
Ag180-8	170.55	169.57	160.18	166.76	5.72	1.14
Ag220-2	165.34	161.15	150.77	150.77	7.50	1.5
Ag220-4	170.61	185.84	159.42	171.96	13.25	2.65
Ag220-6	165.60	150.52	165.34	160.48	8.63	1.73
Ag220-8	163.90	156.56	154.27	158.24	5.03	1.01