



ผลของอุณหภูมิในการอบละลาย 2 ครั้ง และการบ่มแข็ง ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

EFFECTS OF TEMPERATURE IN DOUBLE SOLUTION TREATMENT AND AGING ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF A 319 CAST ALUMINUM ALLOYS

นายพัชร หอมเจริญ รหัส 52363400
 นางสาววิรมณ นุชเนื่อง รหัส 52363455
 นางสาวสุภาวิณี โสภิน รหัส 52365244

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
 วันที่รับ..... 1 ต.ค. 2556
 เลขทะเบียน..... 16322682
 เลขเรียกหนังสือ..... นร.
 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พช ๑๗

๒๕๕๕

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2555



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของอุณหภูมิในการอบละลาย 2 ครั้ง และการบ่มแข็ง ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

ผู้ดำเนินโครงการ นายพัชร หอมเจริญ รหัสนิต 52363400
นางสาววิรมณ นุชเนื่อง รหัสนิต 52363455
นางสาวสุภาวีย์ โสภิน รหัสนิต 52365244

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์
ที่ปรึกษาร่วม ผศ.อัมพร เวียงมูล
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนครราชสีมาให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันส์มฤทธิ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ผลของอุณหภูมิในการอบละลาย 2 ครั้ง และการบ่มแข็ง ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายพัชร	หอมเจริญ	รหัสนิสิต 52363400
	นางสาววิรมณ	นุชเนือง	รหัสนิสิต 52363455
	นางสาวสุภาวณี	โสภิน	รหัสนิสิต 52365244
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กฤษณา	พูลสวัสดิ์	
ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.อัมพร	เวียงมูล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2555		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในการอบละลายครั้งที่ 2 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง รวมถึงได้ทำการศึกษาคอร์สสร้างจุลภาค และความแข็ง ในการอบละลาย 1 ครั้ง เทียบกับการอบละลาย 2 ครั้ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 โดยเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง กับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง พบว่า การอบละลายครั้งที่ 2 ทำให้มีปริมาณโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง มีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง เนื่องจากโครงสร้างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีการละลายลงสู่พื้นหลักได้มากขึ้น ทั้งนี้เมื่อได้มีการนำไปทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนมีปริมาณลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และจากการทดสอบความแข็ง พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบละลายครั้งที่ 2 และเมื่อได้มีการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 2 ไปทำการบ่มแข็งนั้น พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส แล้วทำการบ่มแข็ง จะมีค่าความแข็งที่สูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอแสดงความขอบพระคุณบุคคลผู้มีพระคุณ โดยเฉพาะอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนดูแลติดตามโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.อัมพร เวียงมูล ที่ได้ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ ตลอดการทำโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์, อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ และอาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และขอเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ประจำการทิพย์ กิตติคุณ และนักวิทยาศาสตร์แสงเพชร บุญผาง ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้งานเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การดูแลตลอดการทำโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายพัชร หอมเจริญ

นางสาววิรมณ นุชเนื่อง

นางสาวสุภาวิณี โสภิต

มีนาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	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 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	4
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	4
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	5
2.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ.....	5
2.2 การเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมหล่อโดยกรรมวิธี ทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening).....	11
2.3 เครื่องมือวิเคราะห์ด้านโครงสร้างผลึก และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ.....	18
2.4 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test).....	23
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	26
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์.....	27
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....	35
4.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ.....	35
4.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และที่ผ่านการอบ ละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....	37
4.3 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง และที่ผ่านการอบ ละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....	44
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 บทสรุปของโครงการ.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	57
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	86
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 สัญลักษณ์ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม.....	5
2.2 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณโดยประมาณ).....	8
2.3 สัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน.....	11
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319	27
ก.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ.....	63
ก.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง.....	64
ก.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และทำการบ่มแข็ง.....	65
ก.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	66
ก.5 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำ การบ่มแข็ง.....	67
ก.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	68
ก.7 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำ การบ่มแข็ง.....	69
ก.8 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	70
ก.9 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำ การบ่มแข็ง.....	71
ข.1 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ.....	73
ข.2 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง.....	73
ข.3 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และทำการบ่มแข็ง.....	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.8 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	83
ค.9 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง.....	84



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลำดับการตั้งรหัสสำหรับธาตุผสมแต่ละกลุ่ม.....	6
2.2 ลักษณะของเฟส α -Al และเฟสยูเทคติกซิลิคอน.....	9
2.3 ลำดับการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319.....	10
2.4 เส้นโซลิวัส และโซลิดัส.....	13
2.5 พื้นหลัก และลักษณะการเกิดตะกอน.....	15
2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของโลหะผสมที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการ ตะกอน และถูกทำให้อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดโดยการบ่มแข็ง.....	16
2.7 เส้นโค้งการบ่มแข็ง (Aging Curve) ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง และความแข็งแรงกับเวลาในการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิใดๆ.....	17
2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	19
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	21
2.10 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hard Test).....	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	26
3.2 การอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	29
3.3 การอบละลาย 2 ครั้ง โดยอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอบละลายครั้งที่ 2 ที่ อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศา- เซลเซียส ตามลำดับ.....	30
3.4 การอบละลาย 2 ครั้ง โดยอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียสเป็น เวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศา- เซลเซียส ตามลำดับ.....	31
3.5 การอบละลาย 2 ครั้ง โดยอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียสเป็น เวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศา- เซลเซียส ตามลำดับ.....	31

สารบัญญรูป (ต่อ)

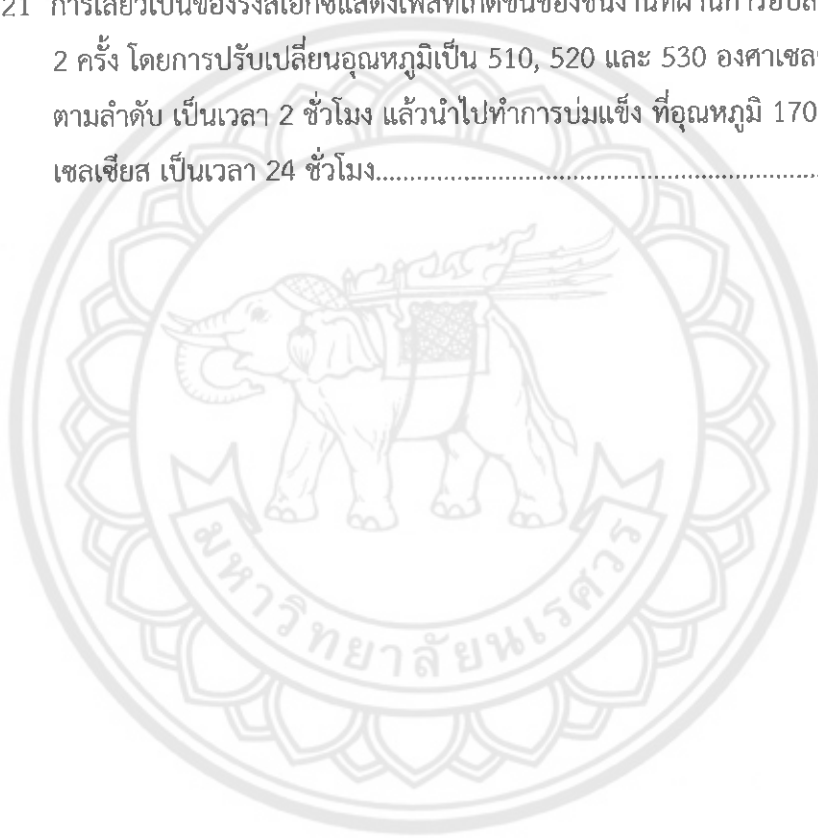
รูปที่	หน้า
3.6 การบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิต่ำ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิต่ำ 80 องศาเซลเซียส.....	32
4.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ.....	35
4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ.....	36
4.3 ชนิด และร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุบนชิ้นงานในสภาพหล่อ ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยหลักการของรังสีเอกซ์แบบจุด (Point Analysis).....	37
4.4 โครงสร้างจุลภาคของเฟสยูเทคติกซิลิคอนในชิ้นงานสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง.....	38
4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง.....	39
4.6 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิต่ำ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	40
4.7 ร้อยละสัดส่วนโดยพื้นที่ของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....	41
4.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....	42
4.9 ปริมาณของธาตุต่างๆ จากการวิเคราะห์ผลโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยหลักการของรังสีเอกซ์แบบพื้นที่ของชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง และผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....	43
4.10 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....	44
4.11 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการอบละลายครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิต่ำ เป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	ร้อยละสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยุคตึกซิลิคอนในชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการอบละลายครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศา- เซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....46
4.13	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการอบละลายครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....47
4.14	ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยน อุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....49
4.15	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยน อุณหภูมิ.....50
4.16	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละ- ลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....51
4.17	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละ- ลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....52
4.18	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละ- ลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....53
4.19	สัดส่วนโดยพื้นที่ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง กับชิ้นงานที่ผ่าน การอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง.....54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามลำดับ กับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	55
4.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญมีการนำมาใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น การนำความร้อน และการนำไฟฟ้าได้ดี แม้ว่าจะมีสมบัติทางกลที่ต่ำ แต่เมื่อผสมกับธาตุอื่นๆ เช่น ซิลิคอน ทองแดง แมกนีเซียม เป็นต้น จะทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น จึงได้มีการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ได้นำมาใช้ในการผลิตส่วนประกอบของล้อเหยียบ ถาดรองน้ำมัน และหัวลูกสูบ (ชาญวุฒิ และสาโรช, 2537)

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) โดยการหลอมักจะพบปัญหาในเรื่องของคุณภาพชิ้นงานหล่อ เนื่องจากในสภาพหล่อประกอบด้วยเฟสยูเทคติก Al-Si และเฟส Al_2Cu ปรากฏอยู่ในโครงสร้าง ส่งผลทำให้มีความแข็งแรงต่ำ เพราะ ดังนั้น จึงได้มีการนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ คือ การอบละลาย (Solution Treatment) แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) จากนั้นนำมาบ่มแข็ง (Aging) ซึ่งในการอบละลาย 1 ครั้ง ไม่สามารถทำให้ได้สมบัติทางกลที่เหมาะสม เนื่องจากเฟสซิลิคอนยูเทคติกที่มีทองแดงผสมละลายได้ไม่สมบูรณ์ หรือไม่ทำให้รูปร่างของซิลิคอนเกิดการเปลี่ยนแปลง (Jerry H. Sokolowski, 2001) ซึ่งถ้านำไปทำการอบละลายครั้งที่ 2 จะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรง หลังการอบละลาย 2 ครั้ง (Double Solution Treatment) ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 จากการศึกษาโครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีการนำอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 มาใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในการอบละลาย 1 ครั้ง เทียบกับการอบละลาย 2 ครั้ง

1.2.2 เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในการอบละลายในครั้งที่ 2 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง เทียบกับการอบละลาย 2 ครั้ง

1.3.2 โครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบละลายในครั้งที่ 2

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 การวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง เทียบกับการอบละลาย 2 ครั้ง

1.4.2 การวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบละลายในครั้งที่ 2

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านกรรมวิธีการหลอมด้วยเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) ที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส

1.5.2 อบละลาย 1 ครั้ง โดยการนำชิ้นงานไปทำกรรมวิธีทางความร้อนด้วยวิธีการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

1.5.3 อบละลาย 2 ครั้ง โดยการนำชิ้นงานไปทำกรรมวิธีทางความร้อนด้วยวิธีการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำไปอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510,

520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งทำการอบละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

1.5.4 ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วแล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แล้วนำไปชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

1.5.5 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วนำไปศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

1.5.6 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน แล้วนำไปทำการศึกษาค้นคว้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และวัดการกระจายตัวของธาตุด้วยหลักการกระเจิงรังสีเอกซ์ (EDXS : Energy Dispersive X-ray Spectrometry) จากนั้นศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวมของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

1.5.7 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วนำไปทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกล บี (Rockwell Hardness Test : Scale B)

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

กรกฎาคม 2555 – กุมภาพันธ์ 2556

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	พ.ศ 2555						พ.ศ 2556	
		ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.8.1	จัดทำข้อเสนอโครงการ	↔							
1.8.2	ศึกษาข้อมูล และวิธีในการอบ ละลายของอะลูมิเนียมผสม- หล่อ เกรด เอ 319	↔	↔						
1.8.3	จัดหาวัตถุดิบ และเตรียม เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง		↔						
1.8.4	ทำการอบละลาย 2 ครั้ง และ ทำการบ่มแข็ง		↔	↔					
1.8.5	-ตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส -ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการกระจายตัวของธาตุ				↔				
1.8.6	ทดสอบความแข็ง					↔			
1.8.7	วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และจัดทำรูปเล่ม						↔	↔	↔

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมหล่อ กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening) เครื่องมือวิเคราะห์ด้านโครงสร้างผลึก และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ การทดสอบความแข็งของวัสดุ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ

อะลูมิเนียมผสมที่หล่อขึ้นรูปมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวาง และได้มีการปรับปรุงสมบัติทางกลอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหลตัวดี ส่งผลให้ผิวของงานหล่อมีความเรียบสวย แต่ก็มีปัญหาเรื่องการหดตัวของโครงสร้างประมาณร้อยละ 3.5-8.5 ในระหว่างการแข็งตัว ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน ในอะลูมิเนียมผสมมีการเติมธาตุหลายตัวลงในอะลูมิเนียม เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้น (I. J. Polmear, 1989) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของการละลายของธาตุนั้นๆ ในอะลูมิเนียมด้วย

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกาได้แบ่งอะลูมิเนียมผสมหล่อตามธาตุผสมที่เติมเข้าไปในอะลูมิเนียม และตั้งรหัสสำหรับธาตุผสมกลุ่มนั้นๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม
1XX.X	เป็นอะลูมิเนียมหล่อที่ไม่มีการเติมธาตุผสมใดเข้าไปเลย มีอะลูมิเนียมเท่ากับร้อยละ 99.0 โดยน้ำหนัก หรือมากกว่า
2XX.X	มีทองแดง (Cu) เป็นธาตุผสมหลัก
3XX.X	มีซิลิคอน (Si) และทองแดง (Cu) หรือแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมหลัก
4XX.X	มีซิลิคอน (Si) เป็นธาตุผสมหลัก
5XX.X	มีแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมหลัก

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) สัญลักษณ์ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม
6XX.X	มีแมกนีเซียม (Mg) และซิลิคอน (Si) เป็นธาตุผสมหลัก
7XX.X	มีสังกะสี (Zn) เป็นธาตุผสมหลัก
8XX.X	มีดีบุก (Sn) เป็นธาตุผสมหลัก
9XX.X	มีธาตุอื่นๆ (Other Element) เป็นธาตุผสมหลัก

ที่มา : ปัทมา (2554)

สำหรับลำดับการตั้งรหัสสำหรับธาตุผสมแต่ละกลุ่มนั้นจะสามารถทำได้โดยการกำหนดให้เป็นลักษณะ แสดงดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 ลำดับการตั้งรหัสสำหรับธาตุผสมแต่ละกลุ่ม

ที่มา : <http://www.mtaluminium.com/2011/05/aluminum-casting-alloys/>

ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุหลักที่เติมเข้าไปในอะลูมิเนียมผสม เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอะลูมิเนียม ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

ตัวเลขตัวที่สอง และสาม เป็นสัญลักษณ์แสดงอะลูมิเนียมผสมที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไป หรือแสดงค่าความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียม เช่น ในกลุ่ม 1xx.x ตัวเลขลำดับที่ 2 จากทางซ้ายมือแสดงปริมาณอะลูมิเนียมที่ต่ำที่สุดที่เติมลงไปในอะลูมิเนียมผสมหล่อ เช่น อะลูมิเนียมผสมหล่อรหัส 190.x จะมีอะลูมิเนียมร้อยละ 99.90 โดยน้ำหนัก แต่ในกลุ่ม 2xx.x ถึง 9xx.x ตัวเลขลำดับที่ 2 จากซ้ายไม่มีความสำคัญแต่อย่างใด แต่ช่วยในการบ่งชี้ธาตุผสมที่แตกต่างกันในกลุ่มนั้น

ตัวเลขตัวที่สี่ เป็นตัวเลขหลังจุดทศนิยม ซึ่งจะบ่งบอกถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น เลข 1 คือ ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอินกอท และเลข 2 คือ ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอินกอท ที่มีการเติมธาตุอื่นๆ ลงไปด้วย

นอกจากนั้นโลหะบางตัวอาจมีตัวอักษรภาษาอังกฤษนำหน้าตัวเลขที่แทนชื่อของโลหะ เช่น A, B, C, D ทั้งนี้เพื่อแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของโลหะให้ผิดไปจากเดิม เพื่อให้เหมาะกับเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น วิธีการหล่อ เช่น 214 เหมาะสำหรับหล่อลงแบบทราย (Sand Cast), A 214 (มีแมกนีเซียมร้อยละ 3.8 โดยน้ำหนัก และสังกะสีร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนัก) เหมาะสำหรับหล่อลงแบบโลหะ (Permanent Mold)

2.1.1 ชนิดของอะลูมิเนียมผสมหล่อ

ชนิดของอะลูมิเนียมผสมหล่อ มี 4 ประเภทหลัก ได้แก่

2.1.1.1 อะลูมิเนียม-ซิลิคอน

อะลูมิเนียม-ซิลิคอน มักมีการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะ อุตสาหกรรมยานยนต์ที่นำมาใช้ในการผลิตส่วนประกอบของข้อเหวี่ยง ภาตรองน้ำมัน และหัวลูกสูบ เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี สามารถนำไปกลึง ตัด หรือเชื่อมได้ นอกจากนั้นยังมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีด้วย และหากนำธาตุอื่นมาผสม เช่น ทองแดง แมกนีเซียม เป็นต้น ทำให้สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยกรรมวิธีทางความร้อนได้อีกด้วย ปัจจุบันมีการใช้งานอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีมากถึงร้อยละ 85 ถึง 90 ของอะลูมิเนียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ

2.1.1.2 อะลูมิเนียม-ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงทำให้สามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม (มันส์, 2541) โดยอะลูมิเนียม-ทองแดงเป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอดีต แต่ปัจจุบันมีปริมาณการใช้ลดลง เนื่องจากนำอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมาแทน ซึ่งมีสมบัติทางด้านกลหล่อดีกว่าอะลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งส่วนใหญ่มักจะมีปัญหาเรื่องการแตกขณะร้อน (Hot-Tear) และมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่มาก เนื่องจากการหดตัวของโครงสร้างทางจุลภาค นอกจากนี้ความสามารถในการไหลตัวของน้ำโลหะค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในการขึ้นรูปจึงต้องอาศัยแรงดันช่วยในการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ หรือออกแบบช่องทางเดินน้ำโลหะให้กว้าง และเผื่อรูล้นให้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อนำอะลูมิเนียม-ทองแดงไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน สามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้

2.1.1.3 อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม

อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม มีการเติมธาตุต่างๆ ลงไป เช่น เหล็ก, ซิลิคอน ซึ่งทำให้มีสมบัติด้านความแข็งแรงสูง สามารถนำไปเชื่อมได้ดี และมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง

2.1.1.4 อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-ทองแดง

อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-ทองแดง มักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตส่วนเครื่องยนต์ เนื่องจากมีความแข็งแรงทางกล และความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี (Martinez D., et al., 2005) ธาตุที่มักผสมในโลหะผสมนี้ เช่น แมกนีเซียม, แมงกานีส, สฟรอนเซียม, เซอร์โคเนียม และเหล็ก ซึ่งทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงทั้งในอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูง แต่ความเหนียวจะลดลง

2.1.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 เป็นมาตรฐานที่เรียกตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา AA (Aluminum Association) มีองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน-ทองแดง

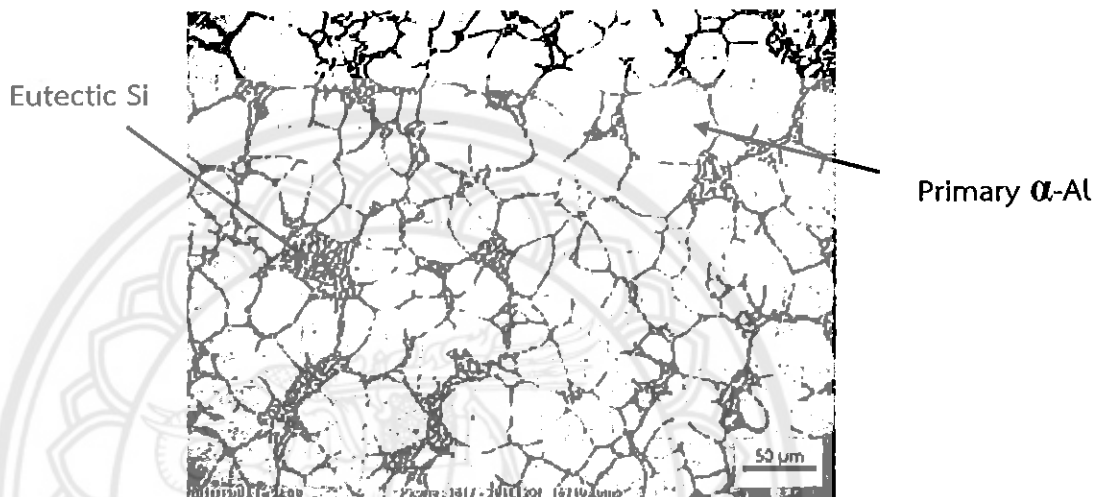
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
อะลูมิเนียม (Al)	Balance	สังกะสี (Zn)	Max 1.0
ซิลิคอน (Si)	5.5-6.5	แมงกานีส (Mn)	Max 0.5
ทองแดง (Cu)	3.0-4.0	นิกเกิล (Ni)	Max 0.35
เหล็ก (Fe)	Max 1.0	ไทเทเนียม (Ti)	Max 0.25
แมกนีเซียม (Mg)	Max 1.0	ดีบุก (Sn)	0.008

ที่มา : Chandler H. (1996)

โดยอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 มีข้อดีหลายประการ เช่น มีสมบัติทางด้านความสามารถในการหล่อ ความสามารถในการเชื่อม ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการกลึง เจาะ ตบแต่ง ด้วยเครื่องจักรได้ดี ในด้านการนำไปใช้งานของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ กระจกสูบของเครื่องยนต์ เพลาค้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ เป็นต้น (พันธุ์ทิพย์ และเอมิกา, 2554) ธาตุที่มักเติมลงไป เช่น ซิลิคอน เหล็ก ทองแดง และแมกนีเซียม ซึ่งทำให้อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 มีความแข็งแรง

ทั้งในอุณหภูมิห้อง และในอุณหภูมิสูง แต่จะมีความเหนียวลดลง ซึ่งในการปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวทำได้โดยการเติมธาตุต่างๆ ลงไป (ปีพมา, 2554)

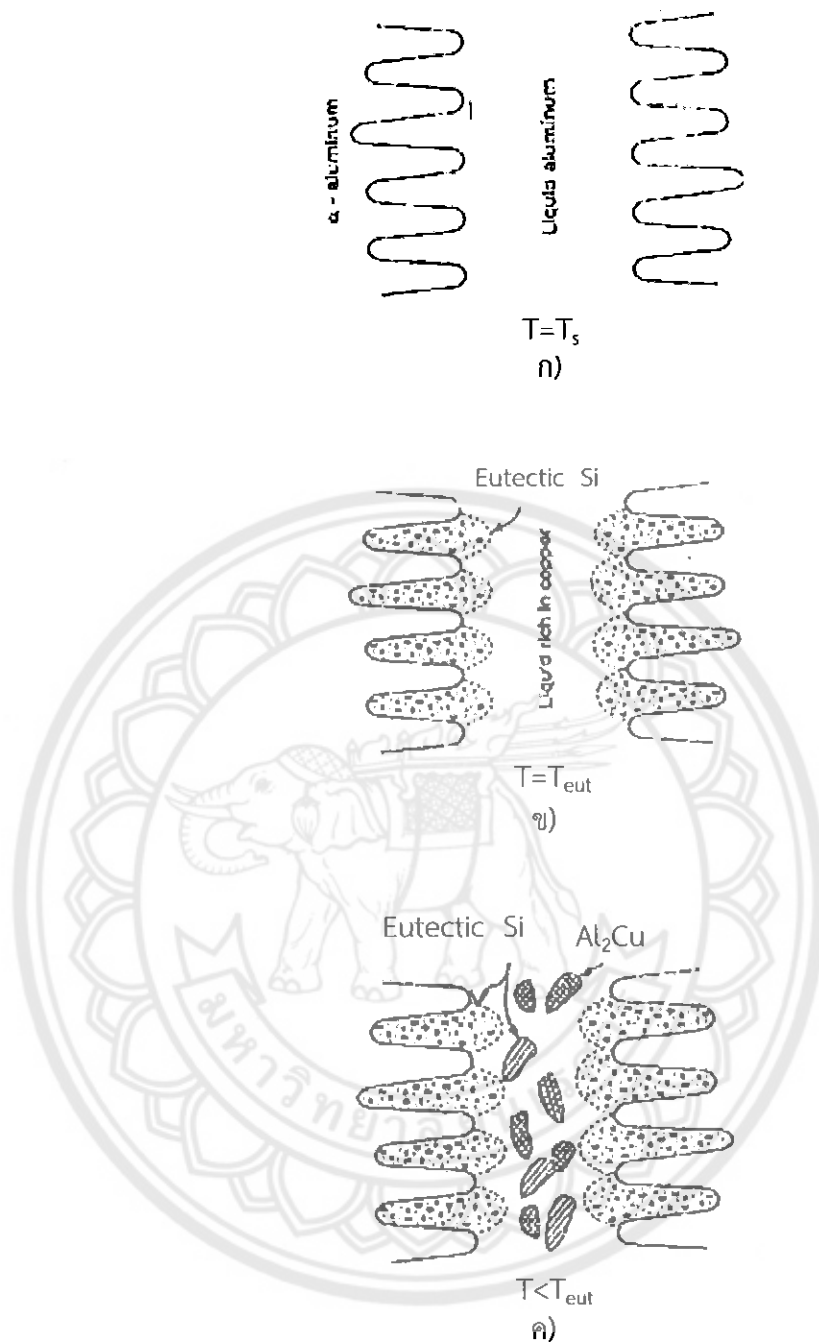
โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 มีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟส α -Al ในส่วนที่เป็นสีขาว โดยจะมีลักษณะกลมมน และเฟสยูเทคติกซิลิคอน (Eutectic Si) ในส่วนดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟส α -Al (พันธ์ทิพย์ และเอมิกา, 2554) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเฟส α -Al และเฟสยูเทคติกซิลิคอน

ที่มา : พันธ์ทิพย์ และเอมิกา (2554)

ลำดับการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 โดยเริ่มจากการเกิดเฟส α -Al เป็นพื้นหลัก มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ทั้งนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 610 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.3 ก) โดยเดนไดรต์นี้จะมีซิลิคอน และทองแดงผสมอยู่ได้เพียงเล็กน้อย จึงมีการผลึก 2 ธาตุนี้ไปอยู่ที่บริเวณขอบระหว่างเดนไดรต์ของ เฟส α -Al แสดงดังรูปที่ 2.3 ข) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 560 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของเฟสยูเทคติกซิลิคอนบริเวณขอบระหว่างเดนไดรต์ของ α -Al โดยรูปร่างของซิลิคอนจะมีรูปร่างกลมมน ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว และเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 520 องศาเซลเซียส จะเกิดการแข็งตัวของเฟส Al_2Cu ขึ้น ซึ่งมีรูปร่างกลมมน แต่จะมีขนาดเล็กกว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.3 ค) (ปีพมา, 2554)



โดยที่ T_s คือ อุณหภูมิการแข็งตัว และ T_{eut} คือ อุณหภูมิยูเทคติก

รูปที่ 2.3 ลำดับการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

ก) การเกิดโครงสร้างเดนไดรต์ของเฟส α -Al

ข) การเกิดเฟสยูเทคติกซิลิคอน

ค) การรวมตัวกันของเฟส α -Al กับเฟสยูเทคติกซิลิคอน และเฟส Al_2Cu

ที่มา : ปัทมา (2554)

2.2 การเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมโดยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)

กรรมวิธีทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมได้มีการกำหนดสัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน โดยสมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (The Aluminum Association of America) แสดงดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน

สัญลักษณ์	กระบวนการทางความร้อน
F	โลหะที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน
O	โลหะหลังการอบอ่อน (Annealing) หรือ T2 เพื่อลดความเครียดด้วยความร้อน และป้องกันการขยายตัวในขณะใช้งาน มีสมบัติด้านความเหนียวที่ดี แต่ความต้านทานแรงดึงต่ำ
H	โลหะที่ได้ผ่านกระบวนการทางกล เพื่อให้มีความแข็งแรงสูงเพิ่มขึ้น
W	การอบละลาย (Solution Treatment) จากนั้นทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (Quench) โดยอาจปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
T1	โลหะที่เย็นตัวภายในบรรยากาศปกติจนถึงอุณหภูมิห้องหลังจากการหล่อ จากนั้นนำไปทำการบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging)
T2	อบอ่อน (Annealed) (ใช้เฉพาะสำหรับงานหล่อเท่านั้น)
T3	โลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) และการขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Worked)
T4	โลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging) เพื่อให้ได้สมบัติความต้านทานแรงดึงที่ดี
T5	โลหะหลังทำการบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) เพียงอย่างเดียว

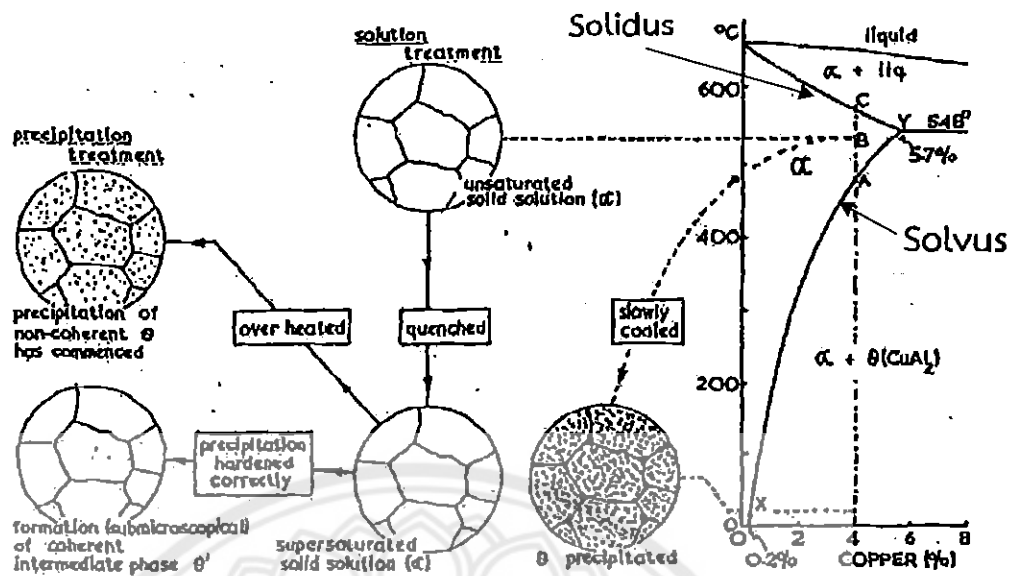
ตารางที่ 2.3 (ต่อ) สัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน

สัญลักษณ์	กระบวนการทางความร้อน
T6	โลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) หลังจากนั้นนำมาบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) ส่งผลให้มีสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยไม่เสียสมบัติการยึดตัว ทำให้โครงสร้างยูเทคติกที่รวมตัวอยู่กับสารประกอบโลหะละลายลงสู่พื้นหลัก ซึ่งทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น
T7	โลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) หลังจากนั้นนำมาบ่มแข็งเทียมเป็นเวลานาน (Overaging) เพื่อให้สมบัติการยึดตัวสูงขึ้น
T8	การอบละลาย (Solution Treatment) และขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Worked) แล้วทำการบ่มแข็ง (Aging)
T9	การอบละลาย (Solution Treatment) แล้วทำการบ่มแข็ง (Aging) หลังจากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง
T10	โลหะที่ผ่านการบ่มแข็ง (Aging) และการขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Worked)

ที่มา : ณรงค์ฤทธิ์ (2555)

2.2.1 การอบละลาย (Solution Treatment)

ในขั้นตอนนี้โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการหล่อ จะถูกให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างเส้นโซลิวัส และโซลิดัส แสดงดังรูปที่ 2.4 หลังจากนั้นจะทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลานาน ทำให้เกิดเป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution) โดยองค์ประกอบทางเคมีของโลหะนั้นจะมีการละลายกลับเข้าไปในเฟส α จนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายมักขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี ทั้งนี้จะมีผลต่อความเหนียว และความแข็งแรงของโลหะ



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมหล่อโดยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)
ที่มา : ปัทมา (2554)

ข้อควรระวังในการอบละลาย คือ ต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดยูเทคติก ซึ่งการอบละลายเหนืออุณหภูมิยูเทคติกจะทำให้ได้รับความร้อนสูงเกินไป (Overheating) ที่ทำให้มีการละลายของขอบเกรนมากเกินไป และมีการสูญเสียสมบัติทางกล เช่น ความเหนียว และความต้านทานแรงดึง ส่วนการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำเกินไป (Underheating) ทำให้การอบละลายไม่สมบูรณ์ และมีความแข็งแรงต่ำ นอกจากนั้นแล้วควรควบคุมเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการอบละลายให้เหมาะสม ซึ่งมีผลต่อปริมาณการละลายของเฟสต่างๆ เพื่อให้ความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และทำให้กลายเป็นสารละลายของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดก่อนการบ่มแข็ง (Black J. T. and Kohser R. A., 2007)

2.2.2 การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)

การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในตัวกลาง นิยมใช้น้ำที่อุณหภูมิ 65-80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการลดอัตราการเย็นตัวของโลหะ เนื่องจากการเย็นตัวที่เร็วเกินไปจะทำให้เกิดการแตกหักภายในเนื้อโลหะผสม หลังทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจะได้สารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) ที่มีโครงสร้างบิดเบี้ยวไม่เป็นระเบียบ ทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น เนื่องจากมีความเครียดในโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านความต้านทานการกัดกร่อน และการ

แตกหักได้ โดยที่เฟสของโลหะผสมที่ผ่านการอบละลายจะอยู่ในสภาวะกึ่งเสถียร อย่างไรก็ตาม สารละลายของแข็งที่มีปริมาณของธาตุผสมในอะลูมิเนียมสูงกว่าปริมาณที่จะมีได้ในสภาวะสมดุล ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิ หรือเวลาเปลี่ยนไปจะทำให้สารละลายของแข็งเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาวะเสถียรทันที (D. R. Askeland., 1996)

2.2.3 การบ่มแข็ง (Aging)

การบ่มแข็ง และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เป็นขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลได้มากกว่าขั้นตอนการอบละลาย ซึ่งเป็นกระบวนการการเพิ่มความแข็ง และความแข็งแรงโดยอาศัยความร้อนในการตกตะกอน ซึ่งการบ่มแข็งสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

2.2.3.1 การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging)

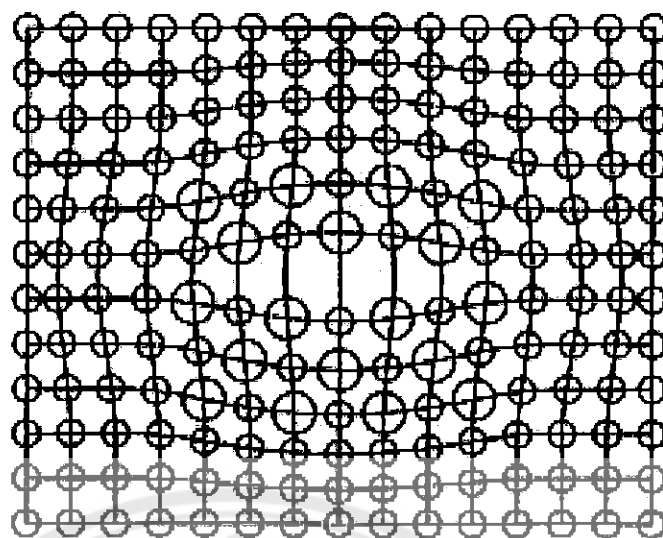
โลหะที่บ่มแข็งด้วยวิธีนี้ทำได้ในโลหะผสม ที่ส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม 2XX.X และกลุ่ม 3XX.X ที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบ โดยประกอบด้วยการอบละลาย แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว และปล่อยให้เกิดตะกอนเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง จะส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึง ความเหนียว และความต้านทานความล้าที่สูง

2.2.3.2 การบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging)

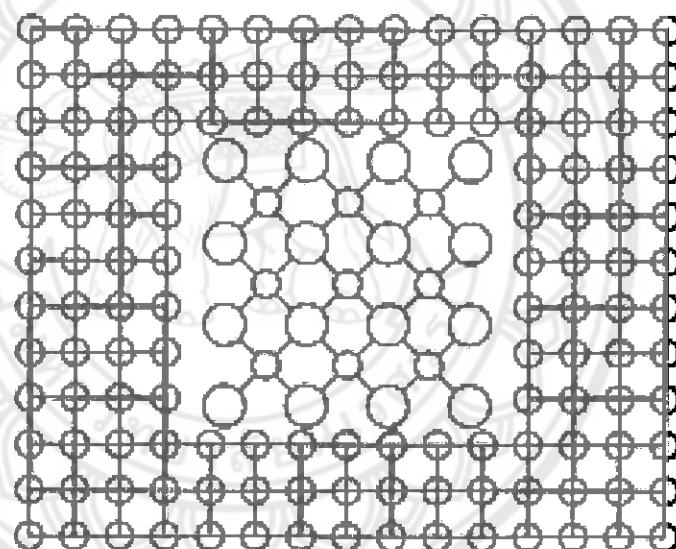
อะลูมิเนียมหล่อผสมส่วนใหญ่ต้องอาศัยความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องในการเกิดตะกอน จากกรณีนี้โดยทั่วไปจะทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 150-250 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน เพื่อให้ตะกอนที่เกิดในระหว่างการบ่มแข็งมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ

สมบัติทางกลสุดท้ายที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง ซึ่งในการจะทำให้อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงที่ดีที่สุดนั้น จะต้องทำให้พื้นหลัก และตะกอนเกิดลักษณะโคฮีเรนต์ (Coherent) หรือเกิดในลักษณะเซมิโคฮีเรนต์ (Semi-Coherent) แสดงดังรูปที่ 2.5 ก) และมีการกระจายตัวของตะกอนสม่ำเสมอ ชิ้นงานจะมีความเค้นสูง เพราะดิสโลเคชัน (Dislocation) เคลื่อนที่ผ่านตะกอนลักษณะดังกล่าวได้ยาก ความเครียดจึงมีค่าสูงเนื่องจากแรงเฉือน

ในกรณีที่ทำการบ่มแข็งนานเกินพอดี (Overaging) จะส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลง โดยตะกอนที่ละเอียดจะลดลง แล้วจะแทนที่ด้วยตะกอนที่หยาบ โดยมีการแยกชัดเจนระหว่างพื้นหลักกับผิวของตะกอน แสดงดังรูปที่ 2.5 ข) ซึ่งแสดงลักษณะตะกอนอินโคฮีเรนต์ (Incoherent) ในพื้นหลัก และมีแนวโน้มที่ทำให้ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งอาจเป็นเพราะช่องว่างระหว่างอะตอมที่เพิ่มขึ้น และจำนวนตะกอนลดลง ส่งผลให้สมบัติทางกลลดลงด้วย



ก)



ข)

รูปที่ 2.5 พื้นหลัก และลักษณะการเกิดตะกอน

ก) ลักษณะตะกอนแบบโคฮีเรนต์

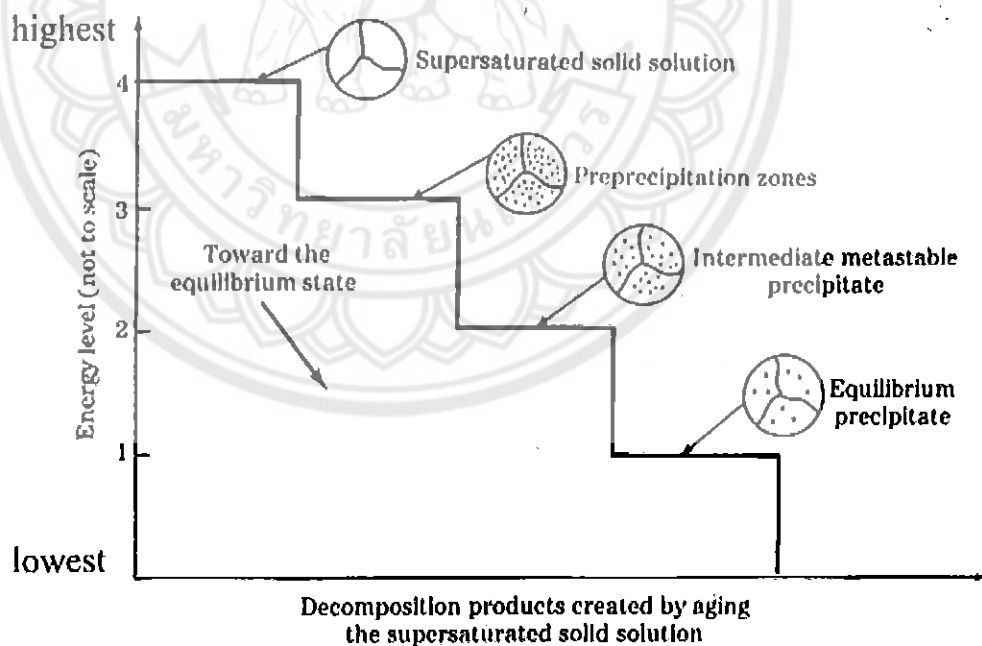
ข) ลักษณะตะกอนแบบอินโคฮีเรนต์

ที่มา : พรวิสา (2551)

2.2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของสารละลายอิมตัวยิ่งยวดในระหว่างการบ่มแข็ง

โลหะผสมที่อยู่ในสภาวะสารละลายอิมตัวยิ่งยวด ในระดับพลังงานนี้โลหะผสมมีแนวโน้มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดไปยังเฟสที่มีพลังงานต่ำกว่า ซึ่งอาจเป็นเฟสกึ่งเสถียร (Metastable Phase)

เมื่อโลหะผสมที่อยู่ในสภาวะสารละลายอิมตัวยิ่งยวดถูกนำมาทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ซึ่งใช้พลังงานกระตุ้นน้อย ทำให้อะตอมเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเรียกว่า บริเวณการตกตะกอน (Precipitation Zones) แสดงด้วยตะกอน ดังในระดับพลังงาน 3 ของรูปที่ 2.6 และหากทำการบ่มแข็งต่อไป หรือมีพลังงานกระตุ้นมากเพียงพอ โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งในบริเวณการตกตะกอนนี้จะทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น (Intermediate Metastable Precipitation) แสดงดังรูปที่ 2.6 และถ้าหากยังทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงต่อไป ตะกอนเหล่านี้ก็จะเกิดการเปลี่ยนเป็นเฟสที่มีความสมดุลมากขึ้น โดยมีระดับพลังงานเท่ากับ 1 ซึ่งส่งผลทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น (แม้น และสมชัย, 2544) แสดงดังรูปที่ 2.6

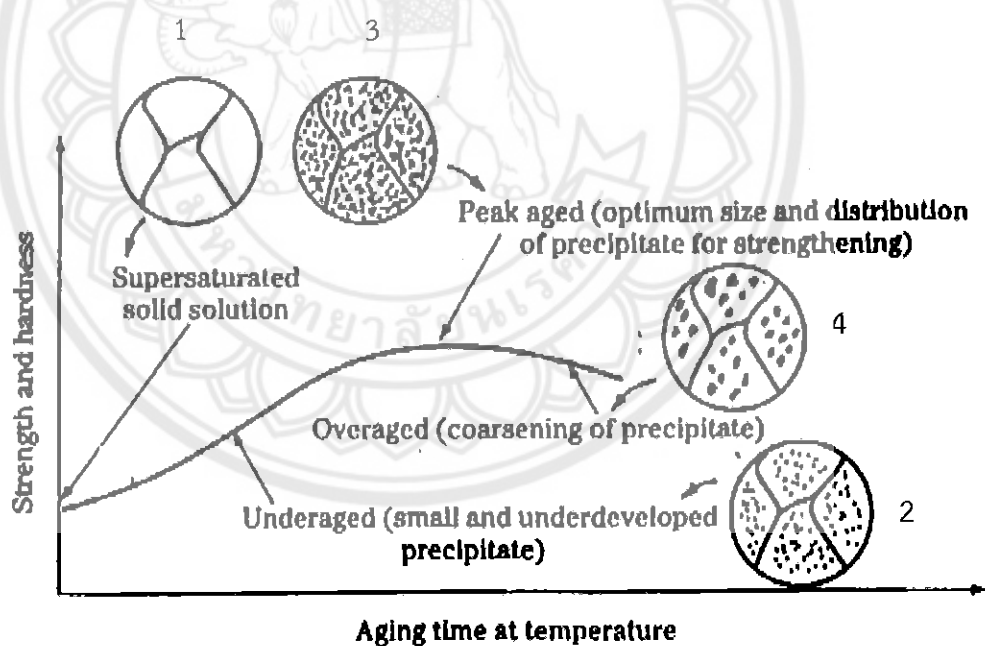


รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของโลหะผสมที่สามารถทำการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน และถูกทำให้อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดโดยการบ่มแข็ง
ที่มา : <http://app.eng.ubu.ac.th/~edocs/f20061122Suriya104.pdf>

2.2.5 ผลของเวลาในการบ่มแข็งที่ส่งผลต่อความแข็ง และความแข็งแรงของโลหะผสม

ผลของการบ่มแข็งต่อความแข็งของโลหะผสมที่ผ่านขั้นตอนการอบละลาย และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แสดงได้ด้วยเส้นโค้งการบ่มแข็ง (Aging Curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และความแข็งแรงกับเวลาในการบ่มแข็ง แสดงรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าความแข็ง และความแข็งแรงของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดเท่ากับจุดตัดบนแกน x ที่เวลาเท่ากับศูนย์ ณ ตำแหน่งที่ 1 เรียกว่า สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution)

เมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นที่บริเวณการตกตะกอน (Precipitation Zones) จะเริ่มเกิดตะกอน ณ ตำแหน่งที่ 2 เรียกว่า การบ่มแข็งน้อยเกินไป (Underaged) และเมื่อถึงเวลาในการบ่มแข็งพอดีตะกอนก็จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และกระจายตัวได้ดี ส่งผลให้มีความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งที่ 3 เรียกว่า (Peak Aged) หลังจากนั้นถ้ายังทำการบ่มแข็งต่อไป ตะกอนที่มีขนาดใหญ่นี้ก็จะเริ่มหยาบขึ้น ณ ตำแหน่งที่ 4 เรียกว่า การบ่มแข็งเกินขนาด (Overaged) ส่งผลให้มีความแข็ง และความแข็งแรงลดลง (รศ.แมน และ รศ.สมชัย, 2544)



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการบ่มแข็ง (Aging Curve) ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และความแข็งแรงกับเวลาในการบ่มแข็ง

ที่มา : <http://app.eng.ubu.ac.th/~edocs/f20061122Suriya104.pdf>

2.3 เครื่องมือวิเคราะห์ด้านโครงสร้างผลึก และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

2.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบผลึกที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive analysis) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ และปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจการทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-100 อังสตรอม

2.3.1.1 หลักการ และวิธีการวิเคราะห์

หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นหลักการที่ได้นำรังสีเอกซ์ มาใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงาน และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของชิ้นงานโดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงาน และสามารถนำมาใช้ในการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของชิ้นงานนั้นๆ ได้

2.3.1.2 ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการตรวจสอบ

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้

ก. กรณีที่ตัวอย่างเป็นชิ้น ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ทั้งนี้จากนั้นใช้ด้านที่เรียบที่สุดเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่าง

ข. กรณีตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กประมาณ 40 ไมครอน โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม

2.3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค และการกระจายตัวของธาตุ

2.3.2.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง คือ กล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงใช้ส่องให้เห็นวัตถุ ขยายใหญ่กว่าเดิมได้มากที่สุดประมาณสองพันเท่า ไม่อาจมีกำลังขยายที่ใหญ่ขึ้นไปกว่านี้อีกได้ เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นภายในกล้องจุลทรรศน์เป็นภาพที่เกิดจากคลื่นแสง ซึ่งมีขีดจำกัดขึ้นกับขนาดของภาพกับช่วงคลื่นของแสง ถ้าภาพมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับช่วงคลื่นของแสง ก็จะไม่อาจส่องขยายภาพให้เห็นใหญ่มากๆ ได้

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงดังรูปที่ 2.8 สามารถที่จะช่วยให้มนุษย์มองเห็น รายละเอียดได้สูงสุดในระดับของช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400 ถึง 700 นาโนเมตรเท่านั้น (หรือ ที่ดีที่สุดก็อยู่ในช่วงระดับความละเอียด 200 ถึง 400 นาโนเมตร) (วิรุจน์, 2553)



รูปที่ 2.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ที่มา : http://flintstone-flint.blogspot.com/2009/06/blog-post_21.html

ก. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ในการเตรียมชิ้นงานนี้จะต้องมีผงขัดทำหน้าที่ขัดดูเอาผิวชิ้นงานออกไป จนได้คุณภาพของผิวงานที่เราต้องการ ผงขัดที่มีขนาดละเอียดมากๆ จะยิ่งทำให้ผิวชิ้นงานเรียบยิ่งขึ้นเท่า-

นั้น การเตรียมชิ้นงานจะเสร็จสิ้นขึ้นอยู่กับความต้องการผิวชิ้นงานที่ยอมรับได้ การเตรียมชิ้นงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การขัด (Grinding) และการขัดมัน (Polishing)

ก.1 การขัด ขั้นตอนนี้จะเอาผิวของชิ้นงานที่เสียหาย หรือแปรรูปไปในการตัดชิ้นงานออก ขณะเดียวกันก็จะทำให้ผิวที่เกิดขึ้นใหม่นี้เกิดความเสียหายได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยขั้นแรกขัดผิวชิ้นงาน เพื่อปรับแต่งผิวชิ้นงานให้มีระนาบผิวที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยการใช้กระดาษทรายขัดจากเบอร์กระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดต่ำไปจนถึงเบอร์กระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดสูง เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเสียหายน้อยที่สุด

ก.2 การขัดมัน มีวิธีการเหมือนกับการขัด แต่ทำหน้าที่ขจัดผิวของชิ้นงานที่เสียหายหลังจากขั้นตอนในการขัดออก เพื่อที่จะได้ผิวที่ดีกว่าโดยไม่ทำให้ผิวเกิดความเสียหายขึ้นอีก โดยการขัดมันมี 2 แบบ คือ การขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing; OP) เช่น ผงขัดอะลูมินา เป็นต้น และการขัดมันด้วยผงขัดเพชร (Diamond Polishing; DP) ซึ่งการขัดมันด้วยผงขัดเพชรจะมีความสามารถในการขัดสูง และได้ระนาบดีกว่าการขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากผงขัดมีความแข็งประมาณ 8,000 HV ทำให้สามารถขัดวัสดุได้ทุกชนิด

ข. วิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

โดยขั้นแรกวางชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบบนแท่นวางของกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งแท่นวางนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ เพื่อการปรับชิ้นงานตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยังเป็นการปรับระยะความชัดเจนของภาพอีกด้วย จากนั้นเปิดสวิตซ์ ทำการปรับความเข้มของแสงตามต้องการ แล้วปรับระยะชัดเจนของภาพ (Focus) ซึ่งสามารถปรับได้ 2 ระบบ คือ การปรับหยาบ (Coarse Focus Control) จะปรับระยะชัดของภาพได้รวดเร็ว แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ และการปรับละเอียด (Fine Focus Control) จะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มี ความผิดพลาดเกิดขึ้น เมื่อได้ภาพชัดเจนแล้วทำการถ่ายภาพไว้ เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป เมื่อต้องการหยุดการทำงาน ให้ปิดสวิตซ์ และนำชิ้นงานตรวจสอบออกจากแท่นวาง

2.3.2.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และวัดการกระจายตัวของธาตุด้วยหลักการของรังสีเอกซ์ (EDXS : Energy Dispersive X-ray Spectrometry)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และสมบัติบางประการของสสาร ค่าความชัดลึก สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพราะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ภาพที่ได้มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDXS) และ Wavelength Dispersive X-Ray Spectrometry (WDXS) เพื่อทำการตรวจสอบชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบทางเคมี และข้อมูลในเชิงเคมีอีกด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 2.9 เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า จึงเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์ อื่นหลายสาขา



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : <http://www.sec.psu.ac.th/sem.html>

ก. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ก.1 ลักษณะของชิ้นงาน จะต้องอยู่ในสถานะของแข็งทุกลักษณะ เช่น ผง, แผ่น, แท่ง เป็นต้น ต้องแห้งไม่มีความชื้น ถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่ต้องตัดส่วนที่จะดูให้อยู่ที่ประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และหากชิ้นงานมีการนำไฟฟ้าดี สามารถนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้เลย

ก.2 ชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้า จะต้องทำการเตรียมชิ้นงานก่อน โดยที่ทำการเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าหนาประมาณ 100 อังสตรอม สำหรับวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง, ทองผสมแพลตินัม และคาร์บอน ซึ่งการเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยทองหรือทองผสมแพลตินัม จะให้ได้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน แต่ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจะทำให้ข้อมูลทางเคมีที่ได้จากเทคนิค EDXS บิดเบือนไปได้

สำหรับชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้าอาจไม่ต้องทำการเคลือบผิวหน้าชิ้นงานก็ได้ โดยเสี่ยงไปใช้ที่ระบบสุญญากาศต่ำแทน (บัญญัติ และศุภกาญจน์, 2554)

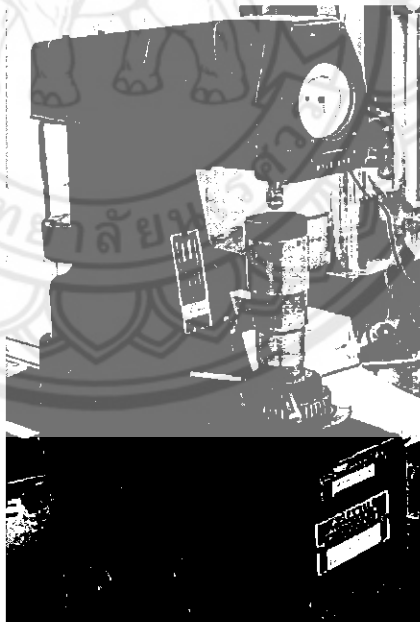
ข. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ การดูลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงาน และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน

ข.1 การดูลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของพื้นผิวโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) โดยภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) จะได้ภาพเป็นพื้นผิวที่มีลักษณะสูงต่ำ มีร่องรอยที่เกิดขึ้นจริงบนชิ้นงาน สามารถวัดขนาดบนชิ้นงานนั้นได้ และภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back-scattered Electron) จะได้ภาพเป็นลักษณะพื้นผิวของงาน แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของชิ้นงานแบ่งเป็นเฟสสว่าง และเฟสมืด โดยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะเป็นเฟสสว่าง ส่วนธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่าจะเป็นเฟสมืด

ข.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน โดยใช้ร่วมกับเทคนิคด้วยหลักการของรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าในชิ้นงานมีองค์ประกอบทางเคมีใดบ้าง โดยแสดงเป็นกราฟบอกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุนั้นๆ และสามารถวัดการกระจายขององค์ประกอบทางเคมีได้

2.4 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล (Rockwell Hardness Test) แสดงดังรูปที่ 2.10 เป็นการวัดความต้านทานต่อรอยกด รอยขีดขีด หรือการแปรรูปถาวร (Plastic Deformation) ของวัสดุ ด้วยการให้น้ำหนักกดลงบนหัวกดที่ผิวของวัสดุในช่วงเวลาจำกัด ซึ่งการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลนี้ นิยมใช้มากในอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีทดสอบที่ทำได้รวดเร็ว เนื่องจากสามารถที่จะอ่านค่าความแข็งจากเครื่องทดสอบได้ทันที และสามารถใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานตั้งแต่อ่อนจนถึงแข็งมากได้ เพราะมีให้เลือกใช้หลายสเกล แต่ละสเกลก็เหมาะสมสำหรับโลหะแต่ละชนิด โดยใช้หัวกด และขนาดแรงกดที่ทดสอบต่างกัน เช่น อะลูมิเนียมผสมหล่อ (Cast Aluminum Alloys) เหมาะกับการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล สเกลบี โดยใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด 1/16 นิ้ว และใช้น้ำหนักกด 100 กิโลกรัมแรง ปล่อน้ำหนักให้กดอยู่บนผิวชิ้นงาน ขณะนั้นเข็มบนหน้าปัดนาฬิกาจะเคลื่อนที่ เมื่อเข็มหยุดนิ่งให้จับเวลาประมาณ 15-20 วินาที แล้วนำน้ำหนักที่กดออก จากนั้นอ่านค่าความแข็งจากตัวเลขสเกลบนหน้าปัดของสเกลบี



รูปที่ 2.10 การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล (Rockwell Hardness Test)

ที่มา : http://www.kollewin.com/EX/09-16-06/Rockwell_Hardness.JP

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัทมา อภิชัย (2554) ได้ศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 จากการวัดค่าความแข็งโดยรวม และความแข็งแรงสูงสุด ในสภาพหล่อมีค่าเท่ากับ 34 HRB และ 227 MPa ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า มีค่าความแข็งโดยรวม และความแข็งแรงถึงสูงสุดเท่ากับ 75 HRB และ 400 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการอบละลาย หรือการบ่มแข็งที่เวลาน้อย หรืออุณหภูมิต่ำเกินไป ทำให้ความแข็ง และความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนยังไม่สมบูรณ์ ส่วนการอบละลายที่เวลานาน หรือการบ่มแข็งอุณหภูมิเกินไปทำให้สมบัติทางกลลดลง เนื่องจากตะกอนมีขนาดใหญ่เกินไป

S. Haro, et al. (2009) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลาย และตามด้วยการบ่มแข็งต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 504 และ 545 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 154 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า การอบละลายที่อุณหภูมิ 504 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 154 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึง และความแข็งสูงสุด ซึ่งเมื่อมีการใช้อุณหภูมิในการอบละลายที่สูงขึ้นจะทำให้สมบัติทางกลลดลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งจาก 154 เป็น 200 องศาเซลเซียส จะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวลดลง อย่างไรก็ตาม การบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูง และเวลานานเกินไป จะทำให้อนุภาคที่ตกตะกอนมีขนาดใหญ่เกินไป

Tavitas-Medrano, F. J., et al. (2008) ได้ศึกษาผลของการเติมแมกนีเซียม และสทรอนเซียม ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลหลังการบ่มแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 พบว่า การเติมสทรอนเซียมลงในอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในปริมาณน้อย จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ส่วนการเติมแมกนีเซียมนั้นจะทำให้เกิดเฟส Al_2Cu , Mg_2Si , Al_2CuMg และ $Al_2CuMg_5Si_4$ ทำให้มีค่าความเค้น ณ จุดคราก, ความเค้นแรงดึง และความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งได้ค่าสูงสุดเมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แต่จะมีอัตราการยืดตัว และความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง และถ้าทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูง หรือเวลานานเกินไป จะทำให้สมบัติทางกลเริ่มคงที่ และมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะอยู่ในช่วงการบ่มแข็งเกินขนาด (Overaged)

J. Gilbert Kaufman and Elwin L. Rooy (2004) ได้ศึกษากรรมวิธีทางความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 โดยทำกรรมวิธีทางความร้อนแบบ T4, T5, T6 และ T7 พบว่า ในกรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 มีค่าความต้านทานแรงดึง, ความแข็งแรง ณ จุดคราก, และความแข็งแรงเฉือนที่สูงสุด

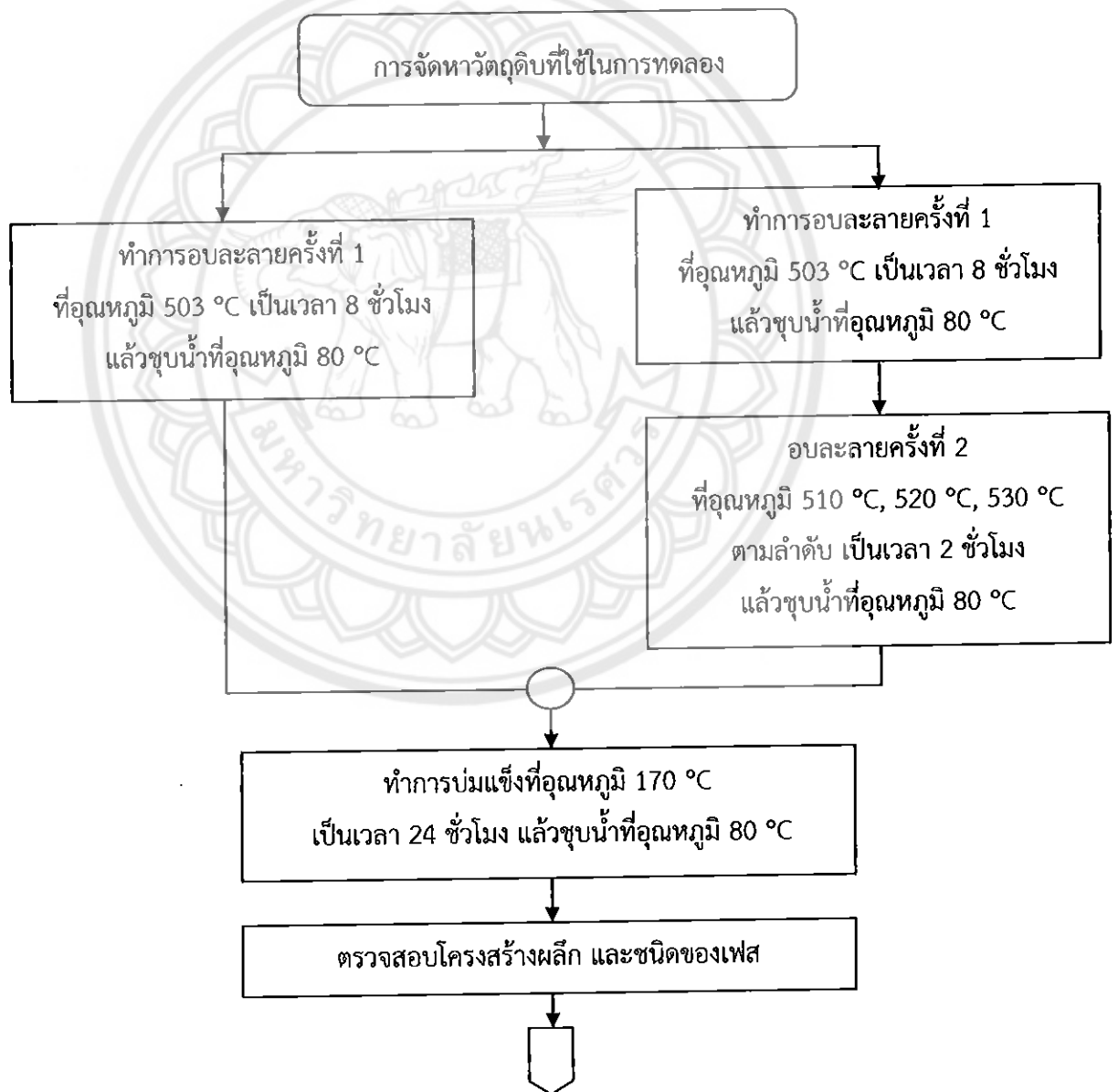
Jerry H. Sokolowski, et al. (2001) ได้ทำการศึกษาผลของการอบละลาย 1 ครั้ง และการอบละลาย 2 ครั้ง ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าการอบละลาย 1 ครั้ง และโครงสร้างยูเทคติกยังละลายลงสู่พื้นหลักได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามหากในการอบละลายครั้งที่ 1 โดยใช้อุณหภูมิสูง หรือต่ำกว่า 495 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มที่จะทำให้ละลายสมบัติทางกล เนื่องจากไม่สามารถเพิ่มการละลายของโครงสร้างยูเทคติกของเฟสที่มีทองแดงมากได้ และไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างอสัณฐานวิทยาของซิลิคอนได้

Jerry H. Sokolowski, et al. (1995) ได้ศึกษาการอบละลายสองครั้งเพื่อกำจัด เฟส Al_2Cu และเพิ่มสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 โดยทำการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 495 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เป็น 505, 515, 520, 525, และ 540 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 2 โครงสร้างยูเทคติกมีการละลายลงสู่พื้นหลักมากกว่าการอบละลายเพียงครั้งเดียว และทำให้ความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิมากกว่า 520 องศาเซลเซียส จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

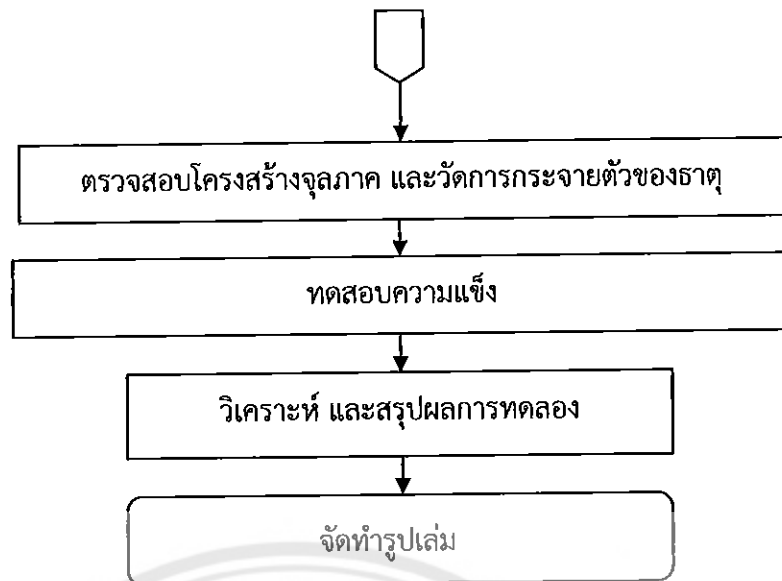
บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

สำหรับวิธีการดำเนินโครงการนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน วัสดุ และอุปกรณ์ ที่ใช้ในโครงการ โดยขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบละลาย 2 ครั้ง และการบ่มแข็งที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อด้วยเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) ที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
อะลูมิเนียม (Al)	Balance	สังกะสี (Zn)	0.060
ซิลิคอน (Si)	4.933	แมงกานีส (Mn)	0.044
ทองแดง (Cu)	3.470	นิกเกิล (Ni)	0.012
เหล็ก (Fe)	0.288	ดีบุก (Sn)	0.008
แมกนีเซียม (Mg)	0.194	ไทเทเนียม (Ti)	0.006

ที่มา : ปัทมา (2554)

3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ข. เตาอบอุณหภูมิสูง
- ค. เครื่องขัดโลหะ
- ง. กระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 500, 800, 1000, 1200
- จ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียดขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน

3.1.2.2 สารเคมี

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

3.1.2.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)
- ข. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
- ค. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- ง. เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ สเกล บี (Rockwell Hardness Test : Scale B)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 ศึกษาทฤษฎี และรวบรวมข้อมูล

- 3.2.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมหล่อ
- 3.2.1.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)
- 3.2.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือวิเคราะห์ด้านโครงสร้างผลึก และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ
- 3.2.1.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งของวัสดุ

3.2.2 การจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

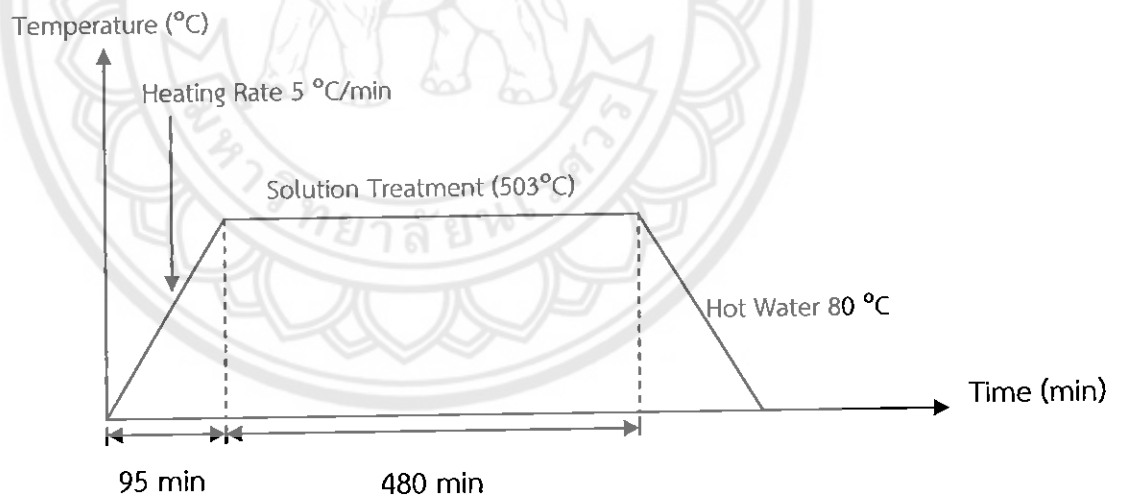
อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ได้นำมาใช้ในการทดลอง คือ เกรด เอ 319 และผ่านกรรมวิธีการหล่อด้วยเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) ที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส

3.2.3 กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening)

นำชิ้นงานที่ผ่านการหลอมมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งประกอบด้วย

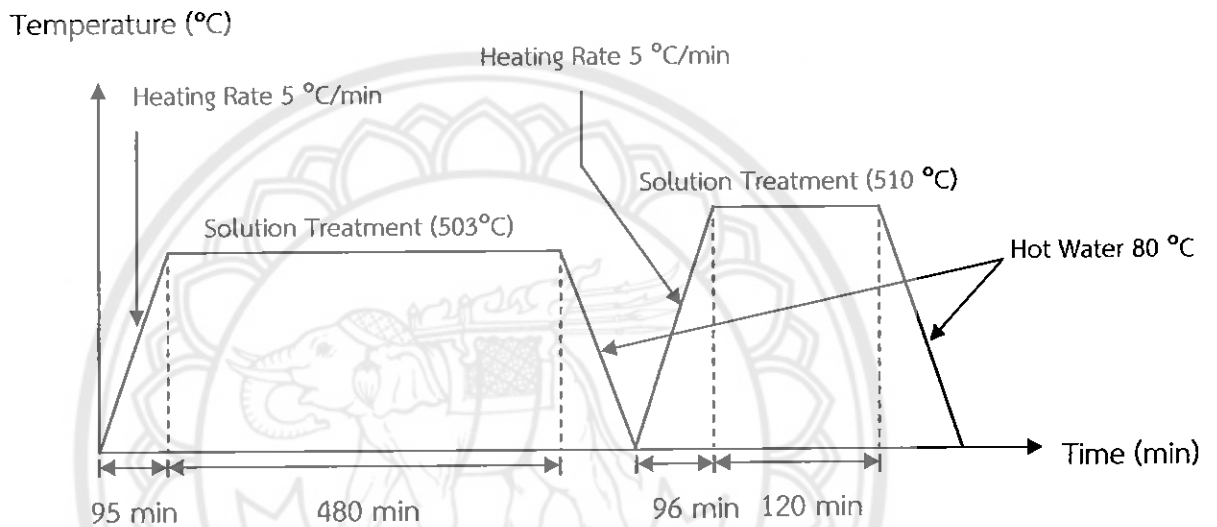
3.2.3.1 การอบละลาย (Solution Treatment) และการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)

ก. การอบละลาย 1 ครั้ง โดยการนำชิ้นงานไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยวิธีการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.2

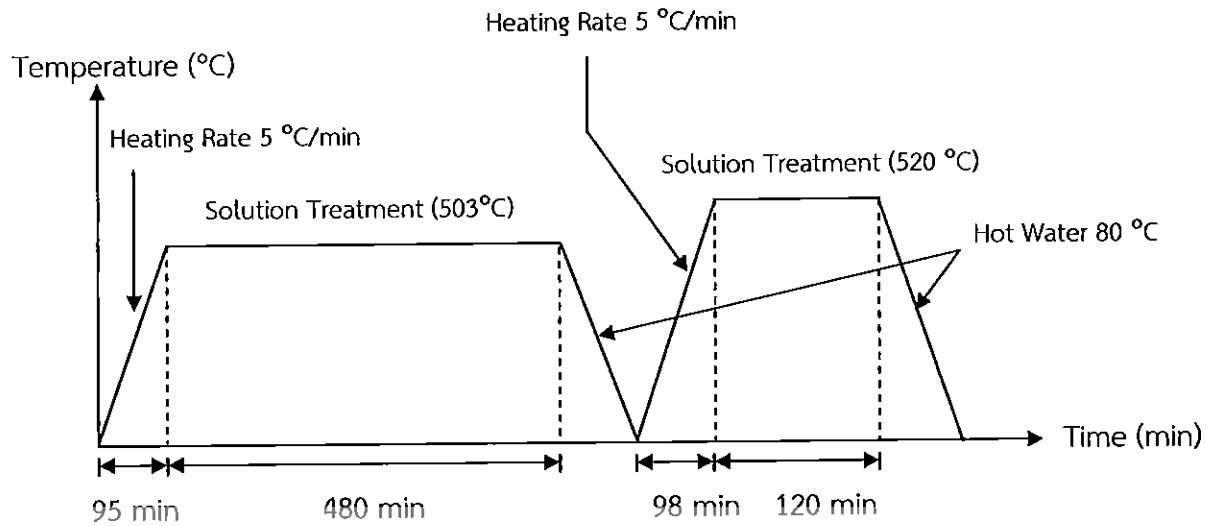


รูปที่ 3.2 การอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

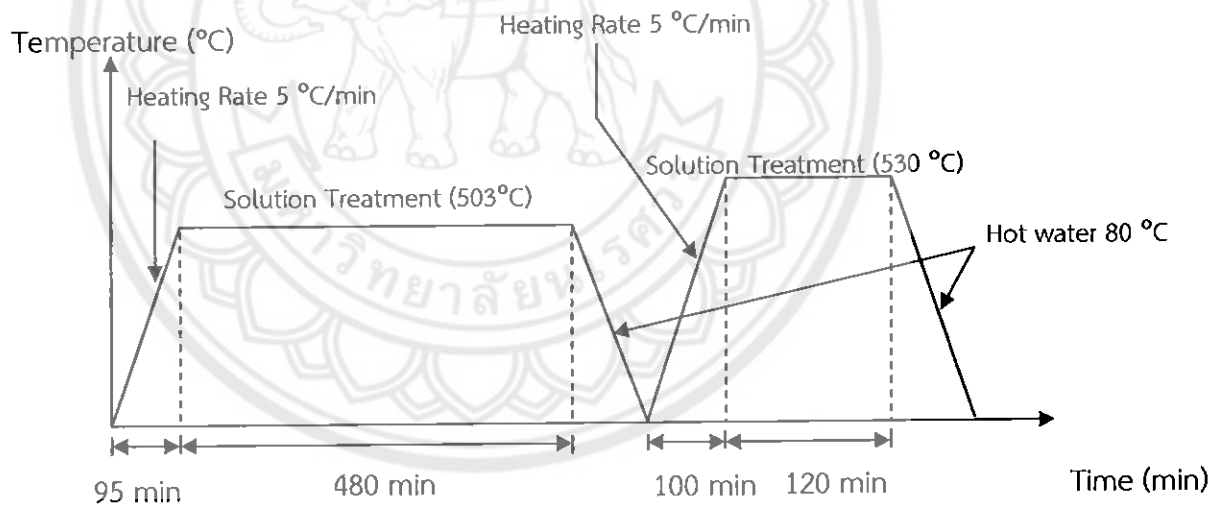
ข. การอบละลาย 2 ครั้ง โดยการนำชิ้นงานไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยวิธีการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มาทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งทำการอบละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จาก นั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 การอบละลาย 2 ครั้ง โดยอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



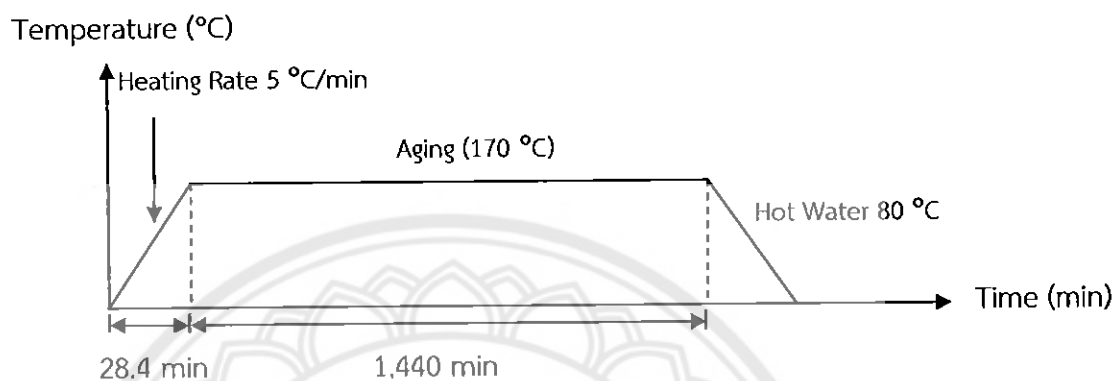
รูปที่ 3.4 การอบละลาย 2 ครั้ง โดยอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 การอบละลาย 2 ครั้ง โดยอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.2.3.2 การบ่มแข็ง (Aging)

นำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วแล้วไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3.2.4 ศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส

นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) ที่มีเป้าโลหะเป็นทองแดง โดยใช้มุมสแกนช่วง 20-110 องศา, Step Size 0.012 องศา, Scan Step time 5.1244 วินาที, ความยาวคลื่น 1.54060 อังสตรอม, Divergence Slit Size 2.0000 (Fixed) และ Specimen Length 10.00 มิลลิเมตร

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.2.4.1 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาขัดด้วยกระดาษทรายด้วยเบอร์ 180, 240, 320, 500, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.2.4.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายมาขัดด้วยผงอะลูมินา (Alumina) ขนาด 1 ไมครอน

3.2.4.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยผงอะลูมินามาตัดให้มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร

3.2.4.4 นำชิ้นงานที่ตัดเรียบร้อยแล้วมาตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

3.2.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และการกระจายตัวของธาตุ

นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และวัดการกระจายตัวของธาตุด้วยหลักการของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometry : EDXS) จากนั้นศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.2.5.1 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาขัดด้วยกระดาษทรายด้วยเบอร์ 180, 240, 320, 500, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.2.5.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายมาขัดด้วยผงอะลูมินา (Alumina) ขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ

3.2.5.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดแล้วไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรในน้ำกลั่น 99.5 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นเป่าให้แห้ง

3.2.5.4 นำชิ้นงานที่กัดกรดเรียบร้อยแล้ว มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และวัดการกระจายตัวของธาตุด้วยหลักการของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometry : EDXS) จากนั้นศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

3.2.6 ทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล สเกล บี โดยกดลงบนชิ้นงาน 11 จุดแบบสุ่ม แล้วหาค่าเฉลี่ย

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.2.6.1 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มาขัดด้วยกระดาษทรายด้วยเบอร์ 180, 240, 320, 500, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.2.6.2 ใช้เครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวล สเกล บี โดยใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1/16$ นิ้ว ใช้น้ำหนักกด 100 กิโลกรัมแรง เป็นเวลา 15 วินาที โดยทำการวัด 11 จุดแบบสุ่ม แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.7 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ได้ มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างจุลภาค และความแข็ง จากนั้นทำการสรุปผลการทดลอง

3.2.8 จัดทำรูปเล่ม

จัดทำเอกสารรวบรวมผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ของลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

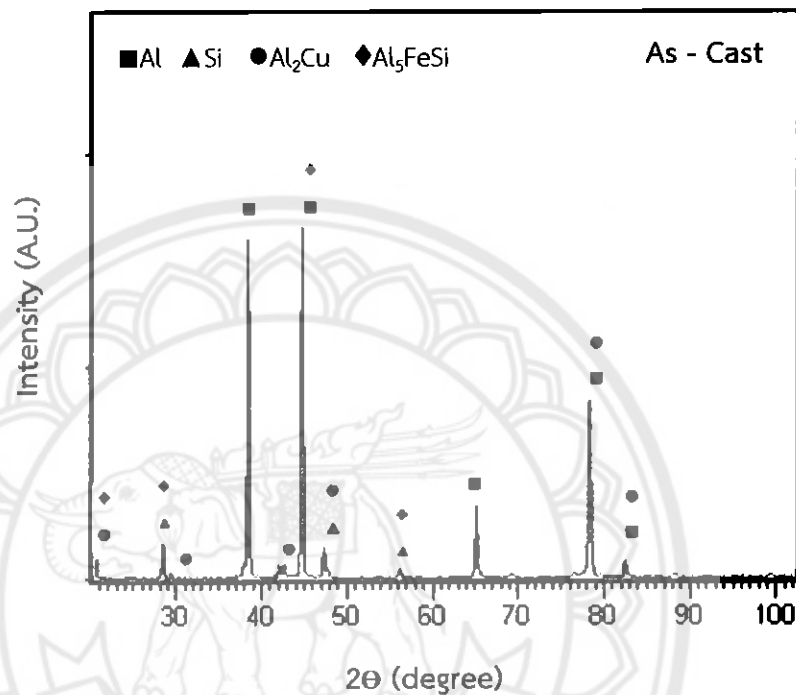
4.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่า โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ ประกอบด้วยพื้นหลักเป็นเฟส α -Al โดยมีลักษณะกลม (Globular Structure) และคล้ายกุหลาบ (Rosette-Like Structure) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเป็นเฟสสีขาว และพบเฟสยูเทคติกซิลิกอนเป็นสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟส α -Al อยู่กันเป็นกลุ่มๆ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ

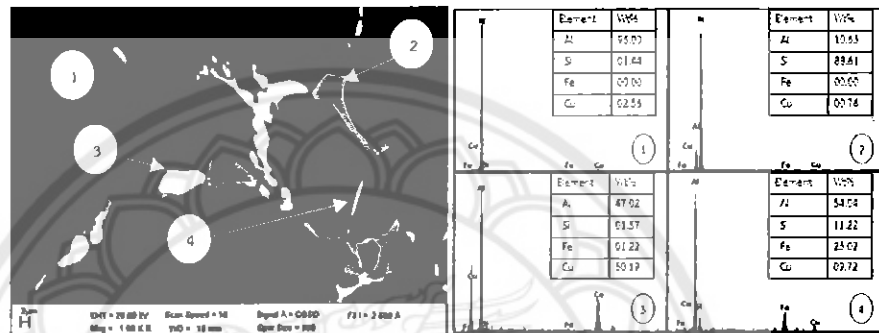
จากการศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส ของชิ้นงานในสภาพหล่อด้วยเทคนิคการ
 เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) พบว่า
 ในสภาพหล่อจะประกอบด้วยเฟส α -Al, เฟสยูเทคติกซิลิคอน, เฟส Al_2Cu และเฟส Al_5FeSi แสดงดัง
 รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319
 ในสภาพหล่อ

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์
 กระจายตัวของธาตุด้วยหลักการกระเจิงรังสีเอกซ์ (EDXS: Energy Dispersive Spectrometry)
 แบบจุด (Point Analysis) แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า หมายเลข 1 บริเวณที่เป็นพื้นสีดำ มีปริมาณอะลู-
 มินเนียมเท่ากับร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก และมีทองแดงกับซิลิคอนอยู่เล็กน้อย ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณ
 เดียวกับพื้นหลักที่มีสีขาวในรูปที่ 4.1 นั่นคือ เฟส α -Al ส่วนหมายเลข 2 บริเวณที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสี
 เทา มีปริมาณซิลิคอนเท่ากับร้อยละ 88.61 โดยน้ำหนัก และมีอะลูมิเนียมกับทองแดงผสมอยู่เล็กน้อย
 ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นสีดำที่อยู่ในบริเวณสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟส α -Al อยู่กันเป็นกลุ่มๆ ใน
 รูปที่ 4.1 นั่นคือ เฟสยูเทคติกซิลิคอน และจากการหาสัดส่วนโดยพื้นที่ (Area Fraction) ของโครง-
 สร้างยูเทคติกซิลิคอนในชิ้นงานสภาพหล่อมีสัดส่วนร้อยละ 12.48 โดยพื้นที่ สำหรับหมายเลข 3 บริ-

เขตที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสีขาว ซึ่งปริมาณของอะลูมิเนียม และทองแดงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเท่ากับ ร้อยละ 47.02 และ 50.19 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์จาก XRD สรุปได้ว่าเฟสนี้ คือ เฟส Al_2Cu (E. Rincon, et al., 2009) และในบริเวณหมายเลข 4 ที่มีรูปร่างเป็นเส้นสีขาว มีปริมาณ อะลูมิเนียม เหล็ก ซิลิคอน ร้อยละ 54.04, 25.02 และ 11.22 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีปริมาณ ทองแดงผสมอยู่เล็กน้อย โดยจากการวิเคราะห์จาก XRD สรุปได้ว่าเฟส Al_5FeSi (E. Rincon, et al., 2009)



รูปที่ 4.3 ชนิด และร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุบนชิ้นงานในสภาพหล่อ ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยหลักการกระเจิงรังสีเอกซ์แบบจุด (Point Analysis)

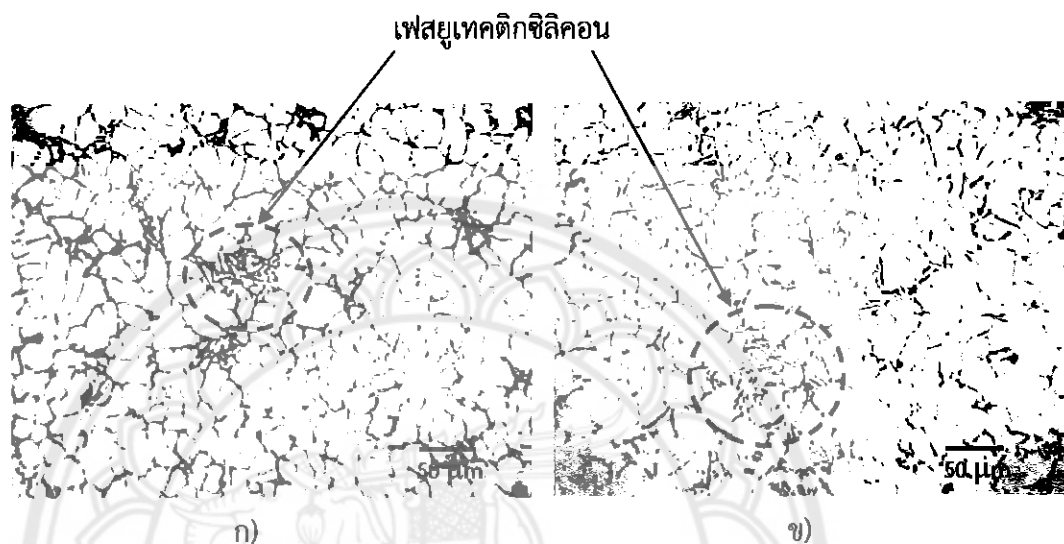
จากการนำอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ มาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล สเกล บี พบว่า ชิ้นงานในสภาพหล่อมีความแข็งเท่ากับ 32.45 HRB

4.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

4.2.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.4 ข) พบว่า หลังจากทำการอบละลายจะทำให้โครงสร้างยูเทคติกซิลิคอน มีลักษณะกลมมนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ ดังรูปที่ 4.4 ก) (Haro S., et al., 2009 และ E. Sjölander, et al., 2010) เนื่องจากในระหว่างการอบละลายนั้นโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนจะมีการละลายตัวลงสู่พื้นหลัก (Jerry H. Sokolowski, 1995 และ J.

Gilbert Kaufman and Elwin L. Rooy, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากการหาสัดส่วนโดยพื้นที่ (Area Fraction) มีสัดส่วนโดยพื้นที่ลดลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ จากร้อยละ 12.48 เป็นร้อยละ 10.86 ทั้งนี้เฟสยูเทคติกซิลิคอนที่อยู่กันเป็นกลุ่มๆ ในชิ้นงานสภาพหล่อ เมื่อผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำให้เริ่มมีการแยกตัวออกจากกัน และกระจายลงสู่พื้นหลักได้มากขึ้น

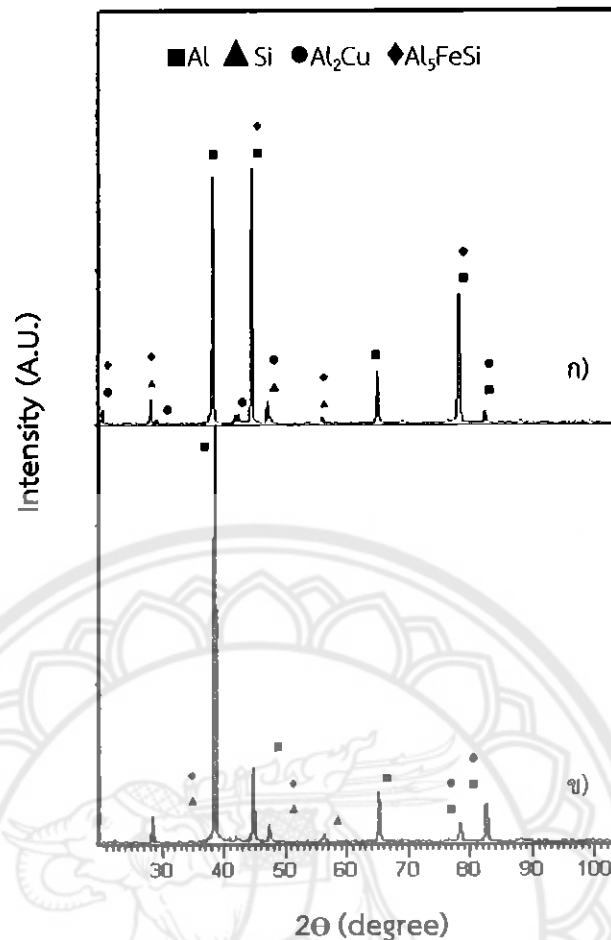


รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของเฟสยูเทคติกซิลิคอนในชิ้นงานสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง

ก) ชิ้นงานสภาพหล่อ

ข) ชิ้นงานที่ผ่านการการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) พบว่า มีเฟสเหมือนกับชิ้นงานในสภาพหล่อ แต่ในส่วนของเฟส Al_2Cu และเฟส Al_5FeSi มีสัดส่วนของ Peak ลดลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ เนื่องจากเมื่อผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง จะทำให้ธาตุต่างๆ มีการละลายลงสู่พื้นหลักมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง

ก) ชิ้นงานในสภาพหล่อ

ข) ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

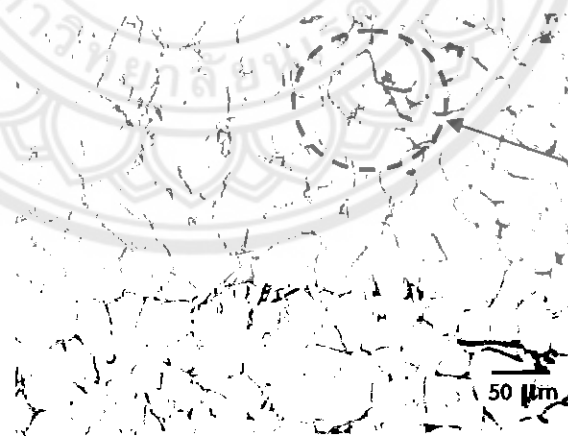
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์กระจายตัวของธาตุด้วยหลักการกระเจิงรังสีเอกซ์ (EDXS: Energy Dispersive Spectrometry) แบบจุด (Point Analysis) พบว่า มีเฟสที่เกิดขึ้นเหมือนกับชิ้นงานในสภาพหล่อ และมีร้อยละโดยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน

และจากการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล สเกล บี มีค่าความแข็งเท่ากับ 37.55 HRB เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 32.45 HRB พบว่า มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะจากทฤษฎีเมื่อทำการอบละลายโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนจะละลายลงในพื้นหลักเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

จะได้สารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) ที่มีโครงสร้างบิดเบี้ยวไม่เป็นระเบียบ ทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น เนื่องจากมีความเครียดในโครงสร้างผลึก จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้นจากชิ้นงานในสภาพหล่อ

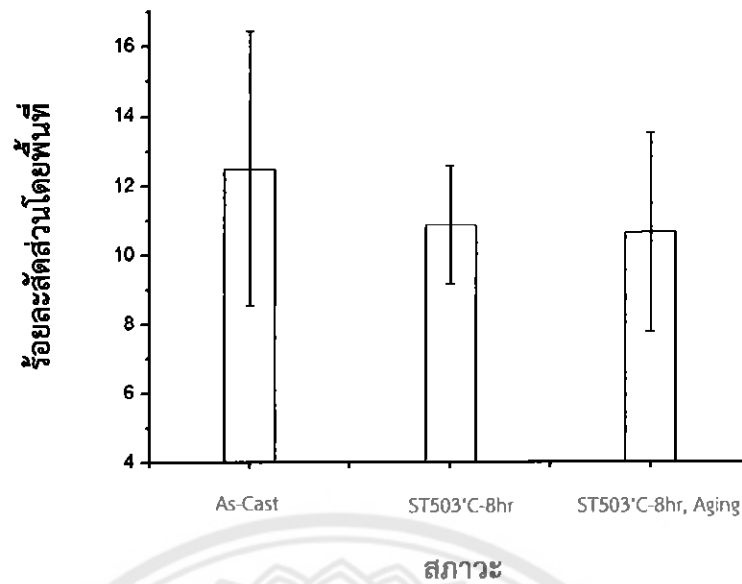
4.2.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งการทำบ่มแข็งจะทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation) ของอนุภาคในโครงสร้างขึ้น โดยตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01-0.5 ไมครอน (สุชอังคณา และ สุริยา, 2553) จึงไม่สามารถเห็นการตกตะกอน ของอนุภาคได้จากกล้องจุลทรรศน์แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่สิ่งที่เห็นคือ โครงสร้างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่อยู่กันเป็นกลุ่มๆ ในชิ้นงานสภาพหล่อ เมื่อผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง จะพบว่า โครงสร้างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่อยู่กันเป็นกลุ่มๆ นั้นจะมีการกระจายตัวอยู่บนพื้นหลักได้มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยจากการหาสัดส่วนโดยพื้นที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 10.64 โดยพื้นที่ ซึ่งเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 10.86 โดยพื้นที่ที่จะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงดังรูปที่ 4.7



เฟสยูเทคติกซิลิคอน

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 ร้อยละสัดส่วนโดยพื้นที่ของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

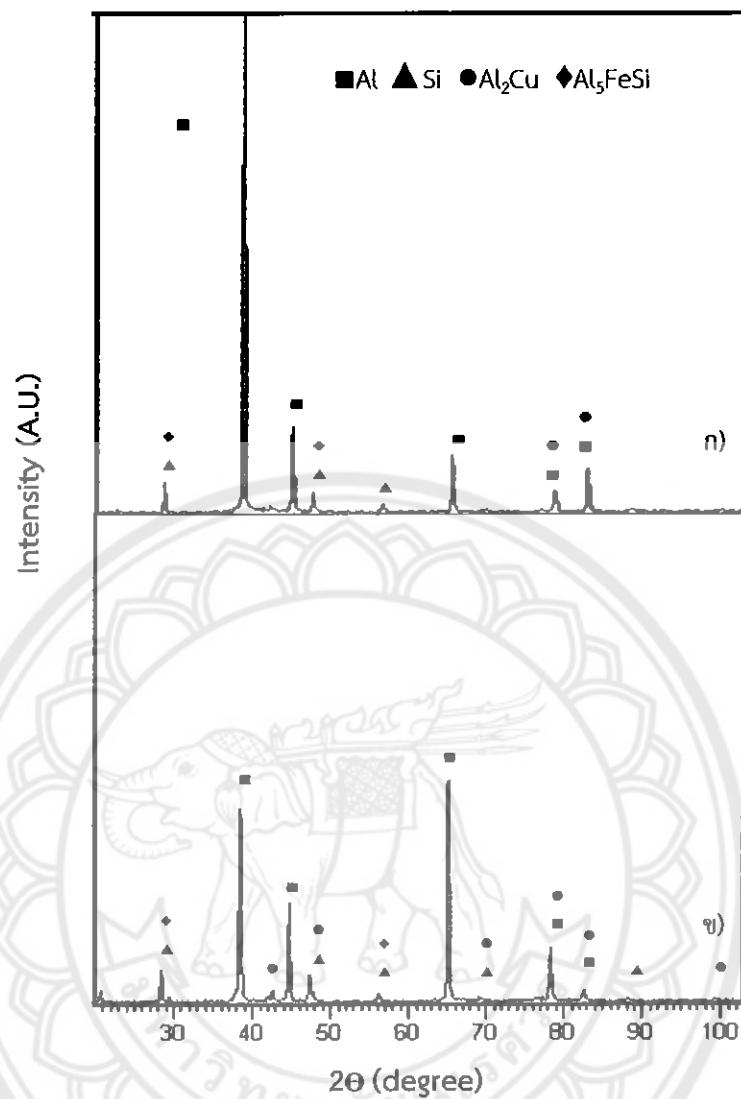
หมายเหตุ :

As-Cast = ชิ้นงานในสภาพหล่อ

ST503°C-8hr = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ST503°C-8hr, Aging = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

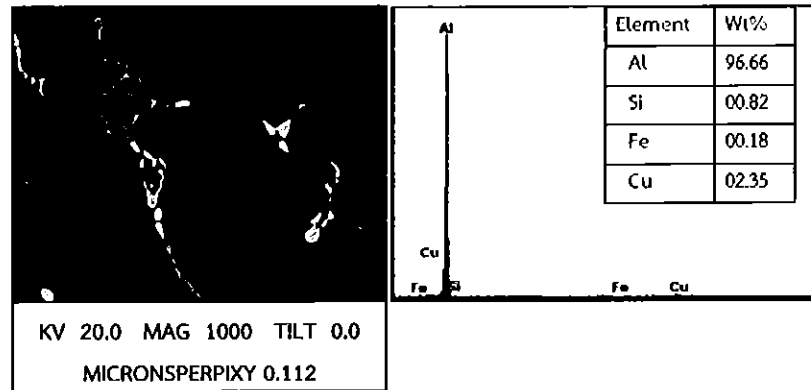
จากการศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) ดังรูปที่ 4.8 พบว่า มีธาตุ และมีเฟสที่เกิดขึ้นเหมือนกับชิ้นงานที่อบละลาย 1 ครั้ง แตกต่างที่ความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในสารประกอบมีปริมาณสัดส่วนลดลง และเมื่อทำการวิเคราะห์กระจายตัวของธาตุด้วยหลักการกระเจิงรังสีเอกซ์ (EDXS: Energy Dispersive Spectrometry) แบบพื้นที่ (Area Analysis) ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุจะมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.9



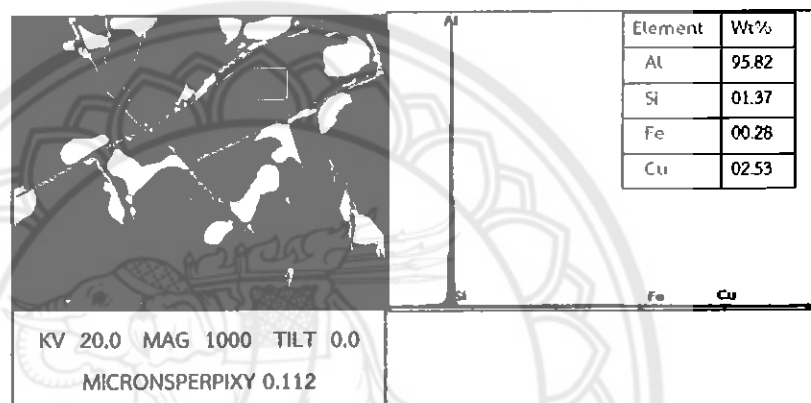
รูปที่ 4.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ก)



ข)

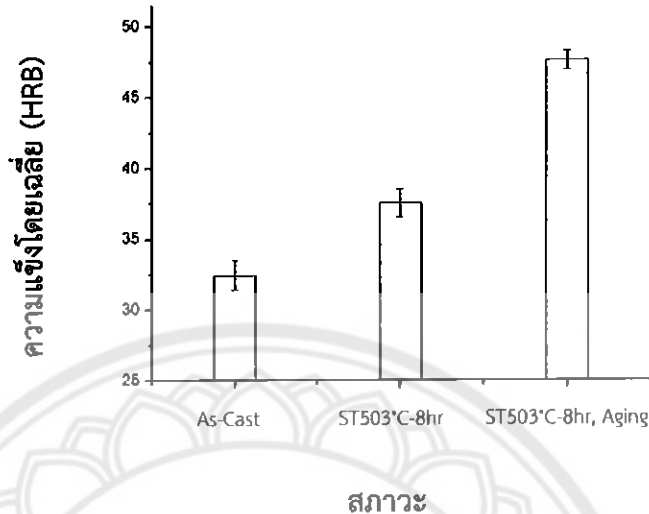
รูปที่ 4.9 ปริมาณของธาตุต่างๆ จากการวิเคราะห์ผลโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยหลักการกระเจิงรังสีเอกซ์แบบพื้นที่ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล สเกล บี พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และทำการบ่มแข็ง มีค่าเท่ากับ 47.65 HRB ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อมีค่าความแข็งเท่ากับ 32.45 HRB และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง โดยไม่ผ่านการบ่มแข็งมีค่าความแข็งเท่ากับ 37.55 HRB แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า มีค่าความแข็งมากกว่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อทำการบ่มแข็งทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่ง

ส่งผลให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะในระหว่างการบ่มแข็งจะทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กของซิลิคอนกระจายตัวอยู่ในพื้นหลัก



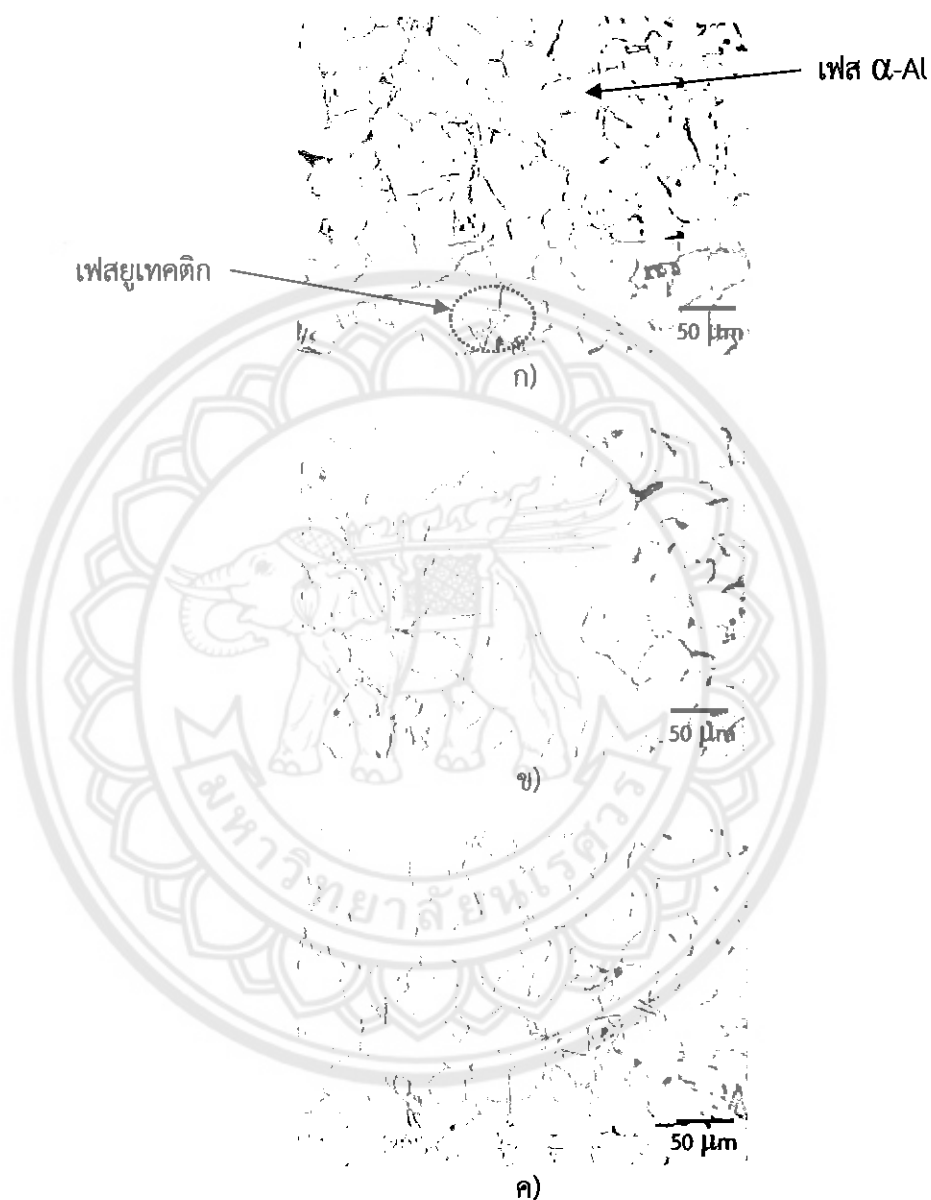
รูปที่ 4.10 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

4.3 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ทำการอบละลาย 2 ครั้ง และชิ้นงานที่อบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

4.3.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส แล้วทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ

ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 2 โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง พบว่า โครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเฟส α -Al มีการแยกตัวออกจากกันเพิ่มมากขึ้นตามการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.11 ก), ข) และ ค) เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ธาตุในโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนละลายลงสู่พื้นหลักได้มากขึ้น จากที่อยู่กันเป็นกลุ่มๆ ก็จะแยกตัวออกจากกัน จากการหาสัดส่วนโดยพื้นที่ของชิ้นงานที่ทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ว่า มีค่าสัดส่วนร้อยละ 9.40, 8.87 และ 7.83 โดยพื้นที่ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งมีปริมาณสัดส่วนโดยพื้นที่ลดลง ดังนั้น สามารถบอกได้ว่าการทำอบละลายครั้งที่ 2 ในเวลาที่เท่ากัน โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะมีการละลายตัวของธาตุในโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนลงสู่พื้นหลักเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิในการอบละลายที่เพิ่มขึ้น

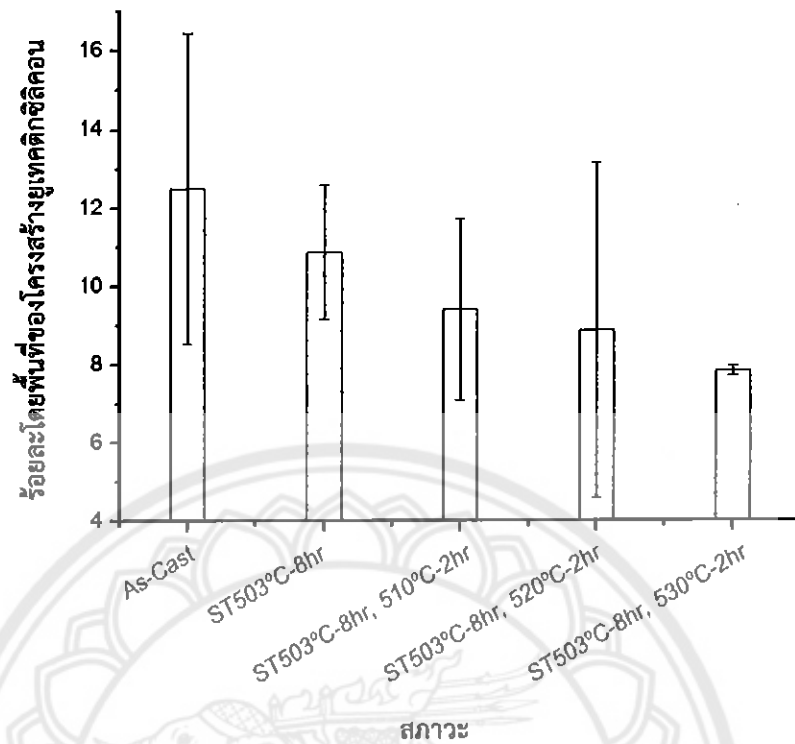


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการอบละลายครั้งที่ 2 เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ก) ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ข) ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ค) ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 ร้อยละสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนในชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการอบละลายครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

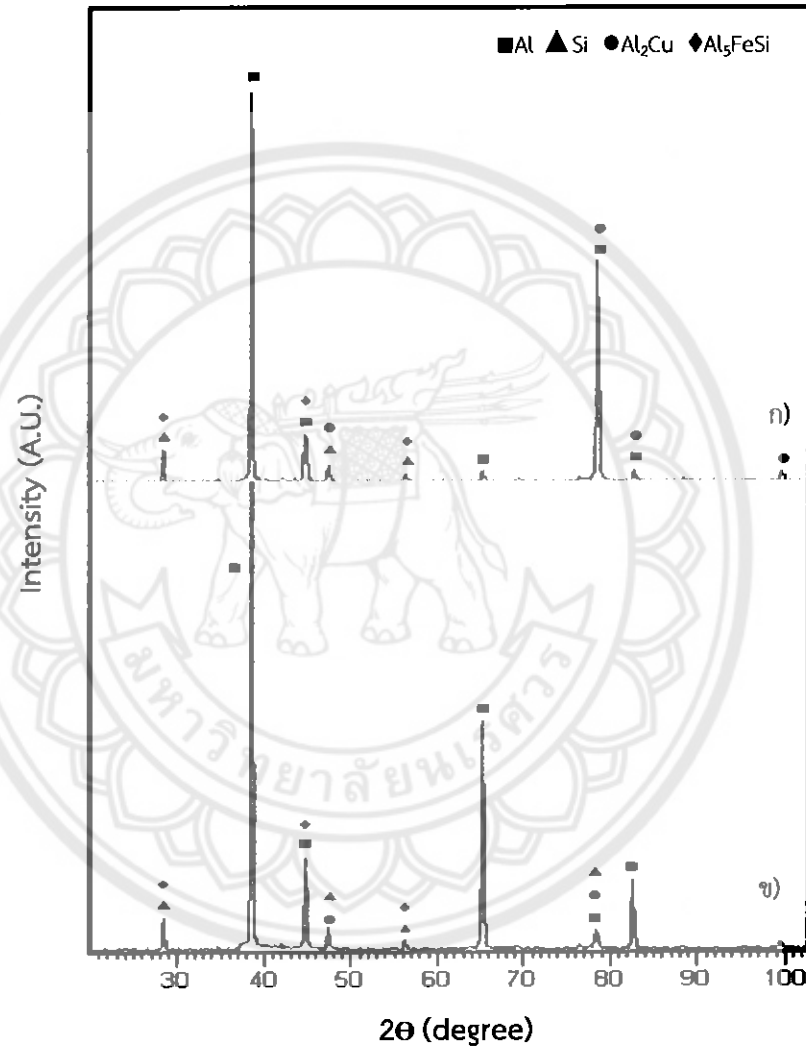
หมายเหตุ :

ST503°C-8hr, 510°C-2hr = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

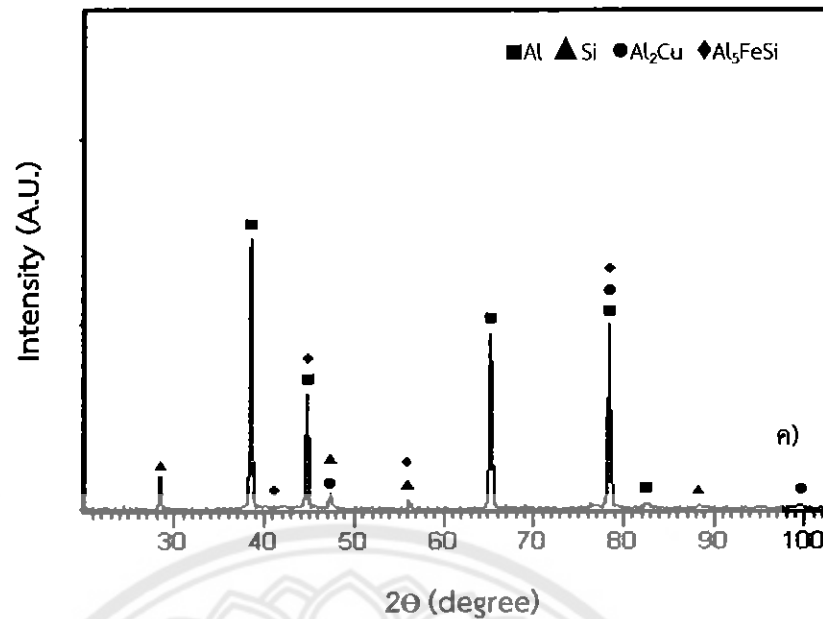
ST503°C-8hr, 520°C-2hr = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ST503°C-8hr, 530°C-2hr = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากการศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) พบว่า มีเฟสเหมือนกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะอุณหภูมิในการอบละลายครั้งที่ 2 ช่วยให้เฟสยูเทคติกซิลิคอน, เฟส Al_2Cu และเฟส Al_5FeSi ละลายลงสู่พื้นหลักได้มากขึ้น แต่ยังคงพบเฟสดังกล่าวในปริมาณที่ลดลง สังเกตได้จากความเข้มของ Peak มีสัดส่วนที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.13

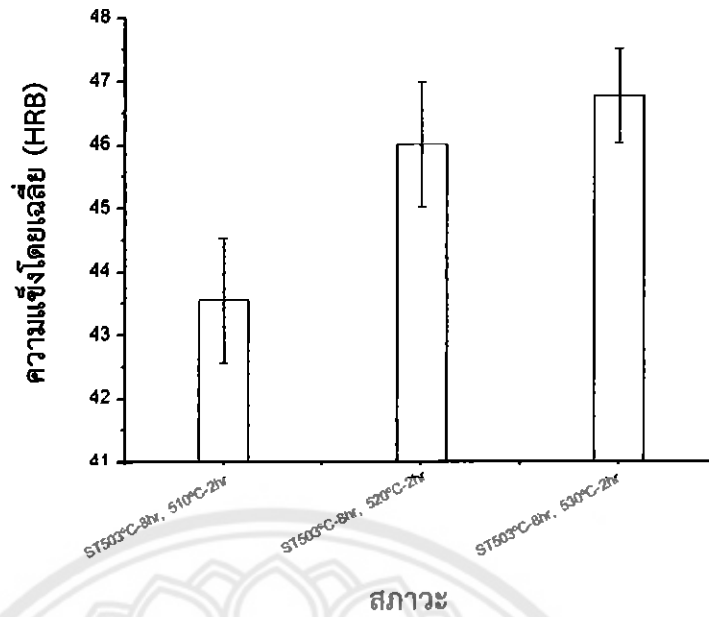


รูปที่ 4.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการอบละลายครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 ก) ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 ข) ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



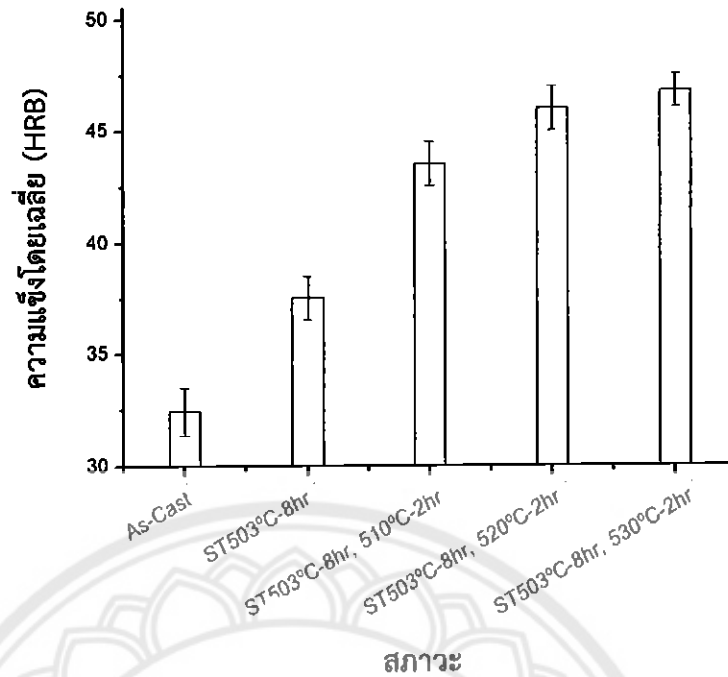
รูปที่ 4.13 (ต่อ) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการอบละลายครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 ค) ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

และจากการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล สเกล บี พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง แล้วนำมาผ่านการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 43.55, 46.0 และ 46.73 HRB ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งเห็นได้ว่า มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการอบละลาย เป็นเพราะมีการละลายของธาตุในโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนลงในพื้นหลักมากขึ้น สอดคล้องกับปริมาณโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนที่ลดลง ดังนั้น แสดงว่า ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนที่ลดลง ส่งผลให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนที่ละลายลงในพื้นหลัก จะทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันของเฟส α -Al มากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ความแข็งแรงโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชุบน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

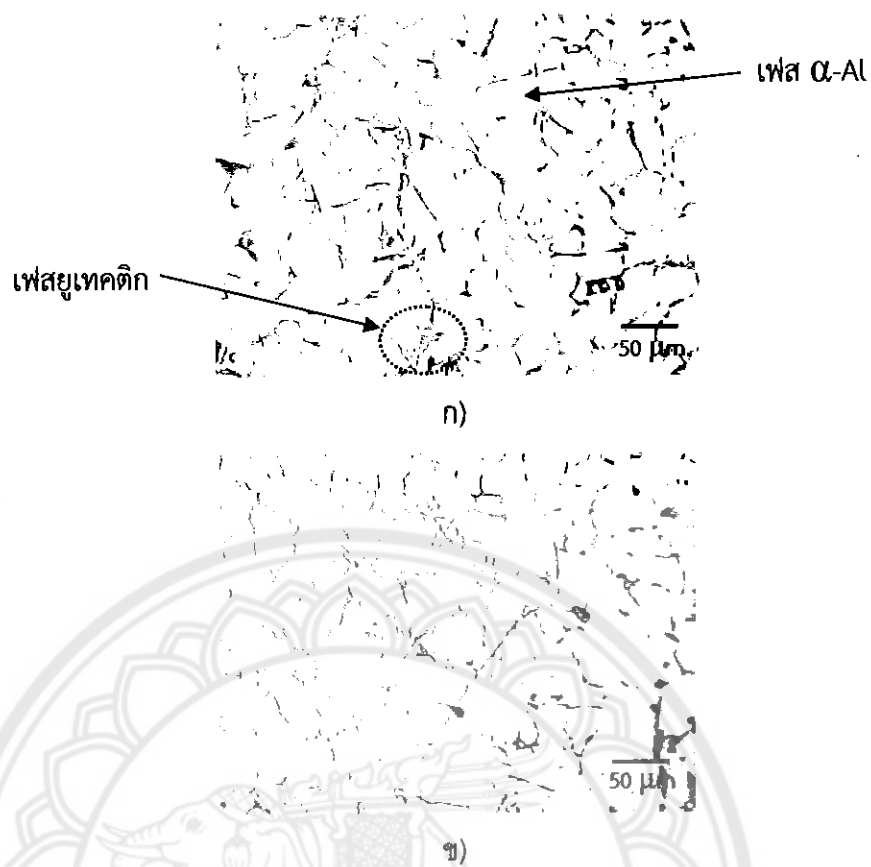
และเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงกับชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง มีค่าความแข็งแรงสูงกว่า โดยที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 46.73 HRB แสดงดังรูปที่ 4.15 และจากการทดสอบด้วยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนของแต่ละสภาวะ (Condition) มีปริมาณโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนลดลง แสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งความสัมพันธ์นี้ตรงกับเหตุผลที่ว่า ปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนที่ลดลง ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงโดยเฉลี่ยของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง และ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 2 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ

4.3.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส แล้วทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

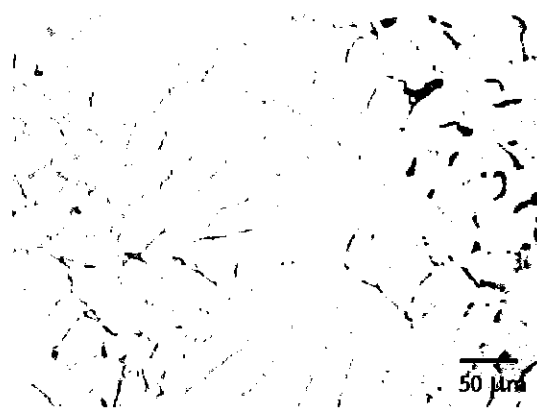
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย-1 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส แล้วทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเมื่อนำชิ้นงานการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 และ 520 องศาเซลเซียส แล้วทำการบ่มแข็ง มาเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง พบว่า เฟสยูเทคติกซิลิคอนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเฟส α -Al ในกระจายตัวบนพื้นหลักมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.16 ก) และ ข), รูปที่ 4.17 ก) และ ข) จากการหาค่าสัดส่วนโดยพื้นที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนของชิ้นงานดังกล่าว จะเห็นว่า ค่าสัดส่วนโดยพื้นที่มีค่าเท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.19 ที่เป็นเช่นนี้เพราะการบ่มแข็งจะทำให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนกระจายอยู่ในพื้นหลักมากขึ้น จึงทำให้มีค่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของชิ้นงานหลังจากการทำบ่มแข็งไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ก)



ข)

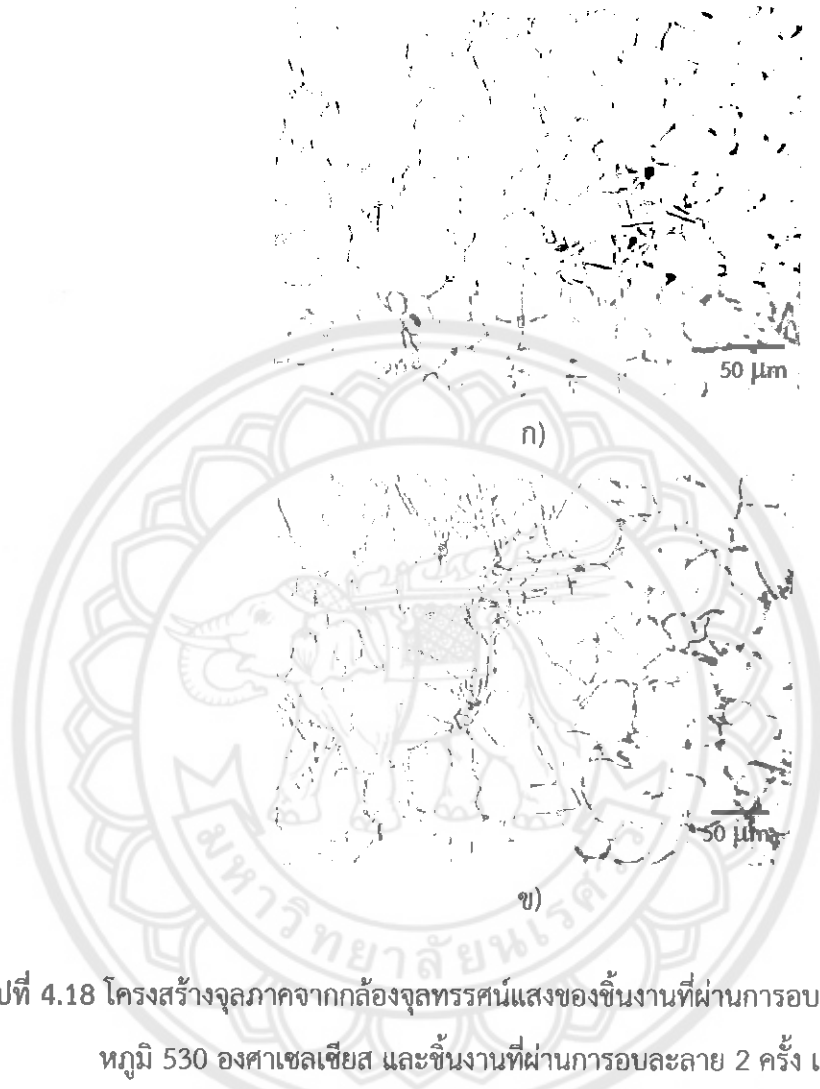
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส แล้วทำการบ่มแข็ง กับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง จะสังเกตเห็นว่า เฟสยูเทคติกซิลิคอนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเฟส α -Al นั้นมีกระจายตัวบนพื้นหลักในปริมาณที่มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.18 ก) และ ข) จากการหาค่าสัดส่วนโดยพื้นที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนชิ้นงานการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส แล้วทำการบ่มแข็ง มีค่าสัดส่วนร้อยละเท่ากับ 9.84 โดยพื้นที่ เมื่อนำมาเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง ซึ่งมีค่าสัดส่วนร้อยละ 7.83 โดยพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า มีค่าสัดส่วน

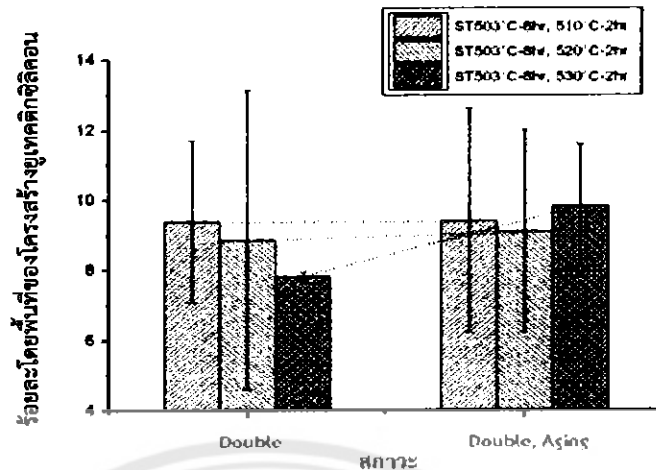
ส่วนโดยพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะโครงสร้างยูเทคติกซิลิโคนเริ่มกลับมาอยู่รวมกันเป็นกลุ่มๆ อีกครั้ง เมื่อหาสัดส่วนโดยพื้นที่จึงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 ร้อยละโดยพื้นที่ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง กับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำการบ่มแข็ง

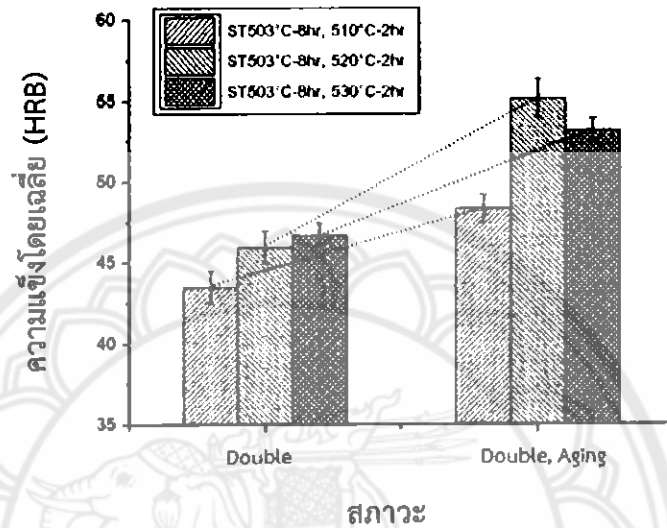
หมายเหตุ :

Double = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

Double, Aging = ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการอบละลายครั้งที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

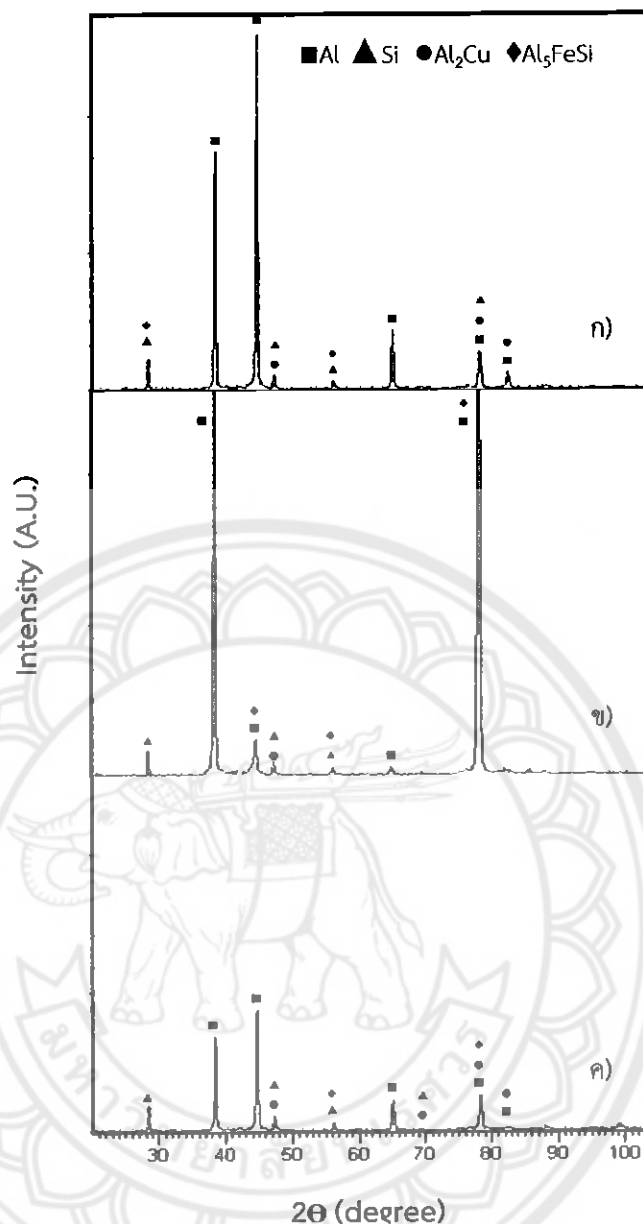
จากผลการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แล้วนำไปบ่มแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบร็อคเวล สเกล บี พบว่า มีค่าแข็งเท่ากับ 48.36, 55.18 และ 53.18 HRB ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้งที่ 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านการบ่มแข็ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 43.55, 46.0 และ 46.73 HRB ตาม-

ลำดับ จะได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง แล้วทำบ่มแข็ง จะมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น จากชิ้นงานที่ทำการอบละลาย 2 ครั้ง โดยไม่ผ่านการบ่มแข็ง ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อทำการบ่มแข็งจะเกิดการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กของซิลิคอนขึ้น และกระจายตัวอยู่บนพื้นหลัก ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.20 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามลำดับ กับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากการศึกษาโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 2 ที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แล้วนำไปทำการบ่มแข็ง พบว่า มีเฟสเหมือนกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง เป็นเพราะการบ่มแข็งจะทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก และกระจายตัวอยู่บนพื้นหลัก จึงยังคงพบเฟสเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง



- รูปที่ 4.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทำการบ่มแข็ง
- ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ค) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของโครงการ

5.1.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง พบว่า มีปริมาณโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนลดลง ซึ่งได้จากการหาร้อยละโดยพื้นที่ (Area Fraction) ของยูเทคติกซิลิคอน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง ได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง มีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง

5.1.2 เมื่อนำอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบละลายครั้งที่ 2 เป็น 510, 520 และ 530 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาเปรียบเทียบกัน พบว่า มีปริมาณร้อยละโดยพื้นที่ของยูเทคติกซิลิคอนลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบละลาย และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง ได้ว่า มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการอบละลายที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยทั้งนี้ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 46.77 HRB

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 การเลือกใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ต้องคำนึงถึงผลการทดลองที่เรามุ่งเน้นต้องการจะศึกษาว่า เครื่องมือชนิดใดเพียงพอที่จะสามารถวิเคราะห์ผลที่เราต้องการได้

5.2.2 ก่อนการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะต้องทำการศึกษาข้อมูล และทฤษฎีต่างๆ ให้เพียงพอเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ หรืออภิปรายผลได้อย่างถูกต้อง

5.2.3 การทดสอบความแข็งจะต้องทำการวัดหลายๆ จุด ทั่วทั้งชิ้นงาน เพื่อจะได้ค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงาน

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 รูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ไม่สามารถอธิบาย หรือแสดงให้เห็นการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กๆ ได้ จึงต้องทำการศึกษากการตกตะกอนด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์อื่นแทน เช่น TEM (Transmission Electron Microscopy) เป็นต้น

5.3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างสูง อาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน จึงควรใช้ความระมัดระวัง และอุปกรณ์ป้องกันความร้อนทุกครั้งที่ใช้ปฏิบัติงาน

5.3.3 การทดสอบความแข็งบางครั้ง ได้ค่าที่ผิดพลาด เนื่องจากการวาง และการขีดชิ้นงานไม่ได้ระนาบ จึงควรระมัดระวังในการวาง และการขีดชิ้นงานให้ได้ระนาบก่อนนำไปทดสอบความแข็งทุกครั้ง



เอกสารอ้างอิง

- ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และสาโรช รุติเกียรติพงศ์. (2537). วัสดุในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : เอช เอ็น กรุป.
- ณรงค์ฤทธิ์ โสสะ. (2555). โลหะอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.scribd.com/doc/99310474/โลหะอะลูมิเนียมผสม-Aluminum-Alloys>. (วันที่ค้นข้อมูล : 25 สิงหาคม 2555).
- ปรัชญา ธนบุญสมบัติ และศุภกาญจน์ คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประตูลู่ โลกระดับจุลภาค. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.
- บล็อกแห่งการเรียนรู้. กล้องจุลทรรศน์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://flintstone-flint.blogspot.com/2009/06/blog-post_21.html. (วันที่ค้นข้อมูล : 29 สิงหาคม 2555).
- ปัทมา อภิขัย. (2554). ผลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของวัสดุ. วิทยานิพนธ์ วท.ม., สาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร.
- พรวสา วงศ์ปัญญา. (2551). การเพิ่มความแข็งในอะลูมิเนียมผสมด้วยกลไกการตะตะกอน (Age Hardening in Aluminum Alloy). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://eng.sut.ac.th/meta/images/stories/pdf/07-Age_Hardening_in_Aluminum_Alloy.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล : 27 กันยายน 2555).
- พันธุ์ทิพย์ สิงห์ลอ และเอมิกา อินทนิล. (2554). ปัจจัยของอุณหภูมิและความเร็วฉีดที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น. วิทยานิพนธ์ วศ.บ., สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร.
- แมน อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. (2544). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ.
- มนัส สติรจินดา. (2541). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิรุจน์ บัวงาม. (2553). เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.learners.in.th/blogs/posts/325228>.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สุขอังคณา ลี และสุริยา โชคสวัสดิ์. (2553) บทที่ 4 กลไกความแข็งแรงของโลหะ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://app.eng.ubu.ac.th/~edocs/f20100714sukangkanal_31.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล : 5 มีนาคม 2556).
- Becthai Bangkok Equipment & Chemical Co., Ltd. **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.sec.psu.ac.th/sem.html>. (วันที่ค้นข้อมูล : 29 สิงหาคม 2555).
- Black J. T. and Kohser R. A. (2007). **Degarmo's Materials & Processes in Manufacturing (10th ed.)**. United States of America.
- Chandler H. (2006). **Heat Treater's Guide Practices and Procedures for Nonferrous Alloys (3rd ed)**. United States of America.
- D. R. Askeland. (1996). **The Science and Engineering of Materials (3rd ed)**. United States of America.
- E. Rincon, et al. (2009). **Temperature effects on the tensile properties of cast and heat treated aluminum alloy A319**. *Materials Science and Engineering A* 519. p. 128-140.
- E. Sjölander, et al. (2010). **Optimisation of solution treatment of cast Al-Si-Cu alloys**. *Materials and Design*. 31. p. 544-549. Department of Mechanical Engineering. Jönköping University. Sweden.
- Heat treatable aluminum alloys**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://app.eng.ubu.ac.th/~edocs/f20061122Suriya104.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 29 สิงหาคม 2555).
- I. J. Polmear. (1989). **Light Alloys: Metallurgy of The Light Metals**. London.
- J. Gilbert Kaufman and Elwin L. Rooy (2004). **Aluminum alloy castings properties, processes and application**. United States of America : ASM international Materials Park.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

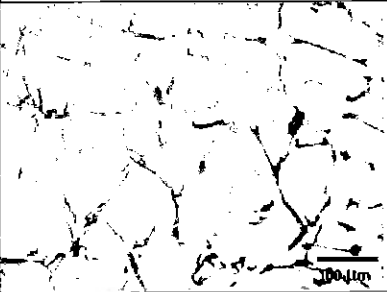
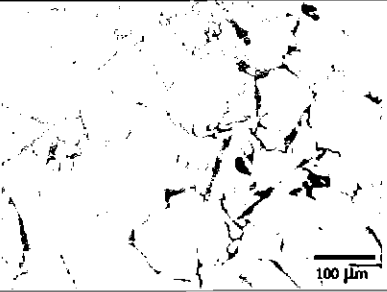
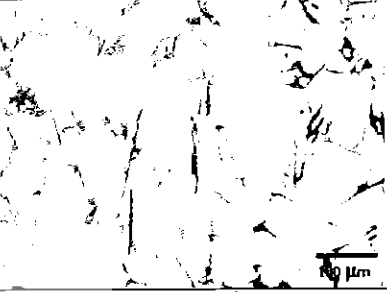
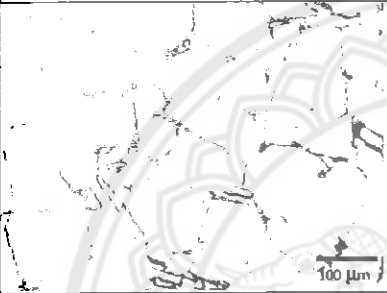
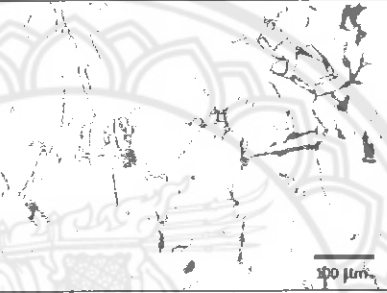
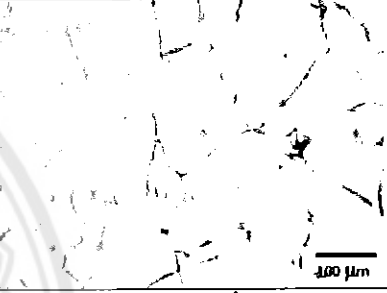
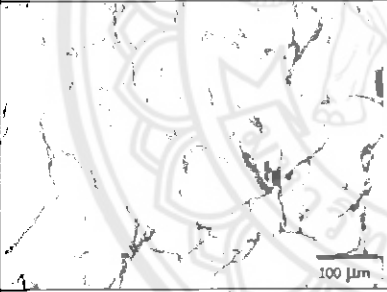
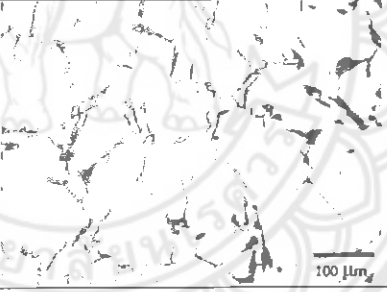
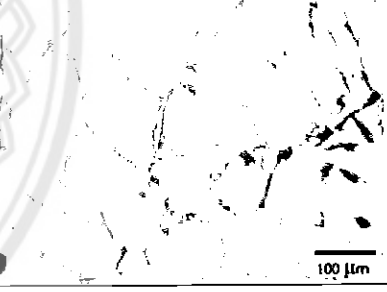
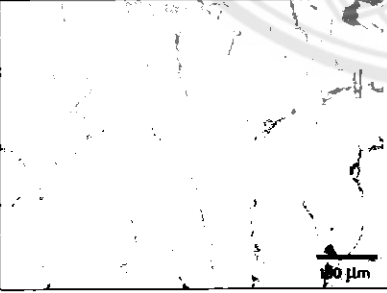
- Jerry H. Sokolowski , et al. (1995). The removal of copper-phase segregation and the subsequent improvement in mechanical properties of cast 319 aluminum alloys by a two-stage solution Heat Treatment. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Jerry H. Sokolowski, et al. (2001). Improvement of 319 aluminum alloy casting durability by high temperature solution treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, 109, p. 174-180.
- Kollewin Technology CO.,Limited. การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hard Test). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.kollewin.com/EX/09-16-06/Rockwell_Hardness.JP. (วันที่ค้นข้อมูล : 24 สิงหาคม 2555).
- Martinez D., et al. (2005). Effect of strontium and cooling rate upon eutectic temperatures of A319 aluminum alloy. *Scripta Materialia*, p. 439-443.
- Muangthong Aluminum Industry Co.,Ltd. อะลูมิเนียมผสมหล่อ (Cast Aluminum Alloys). ALUMINIUM KNOWLEDGE. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mtaluminium.com/2011/05/aluminum-casting-alloys>. (วันที่ค้นข้อมูล : 25 สิงหาคม 2555).
- S. Haro, et al. (2009). Influence of solutionising and aging temperature on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu Alloy. *Materials Science and Technology*, 25(7), 886-891.
- Tavitas-Medrano, F. J., et al. (2008). Effect of Mg and Sr-modification on the mechanical properties of 319-type aluminum cast alloys subjected to artificial aging. *Materials Science and Engineering: A*, p. 356-364.



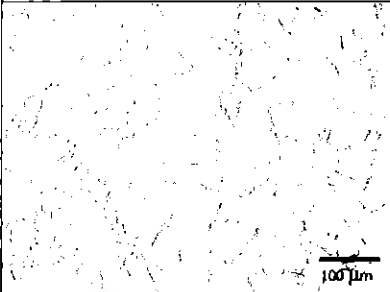
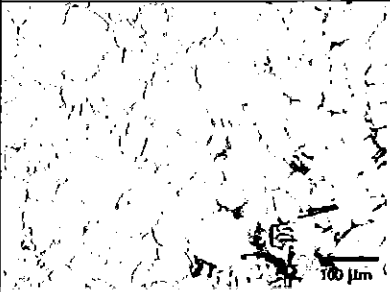

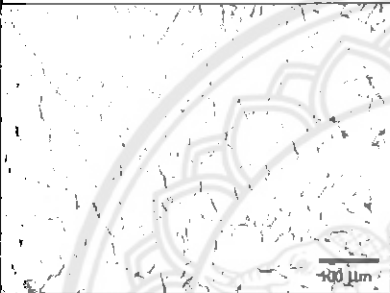
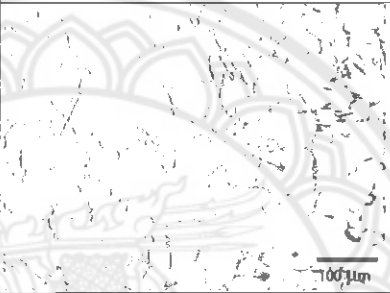
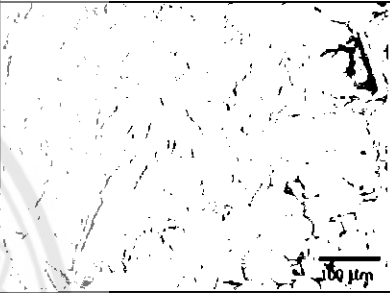
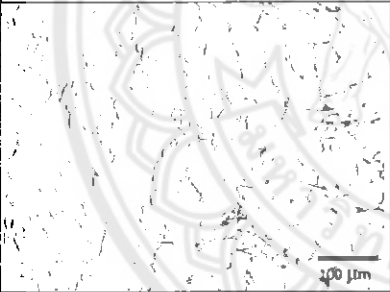
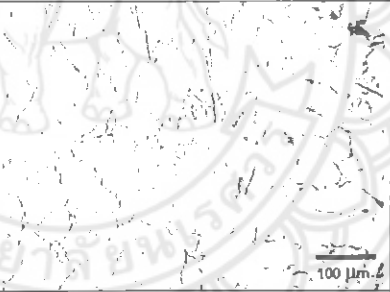
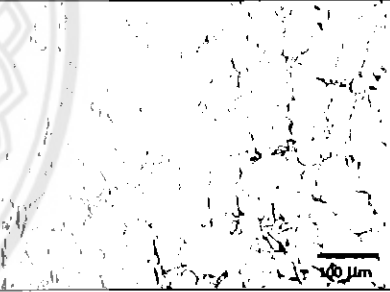
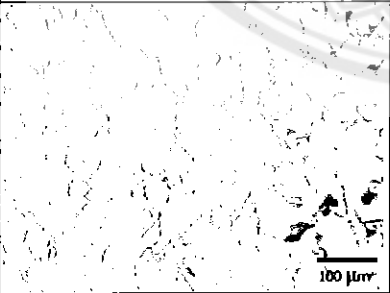
ภาคผนวก ก

โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

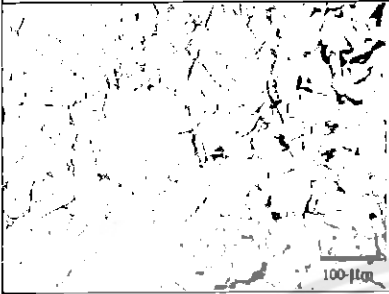
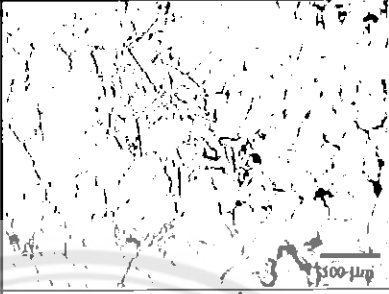

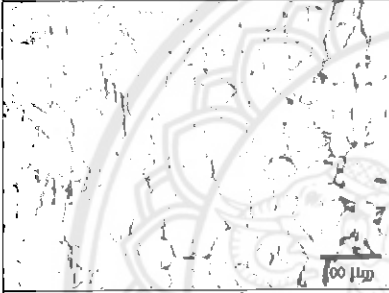
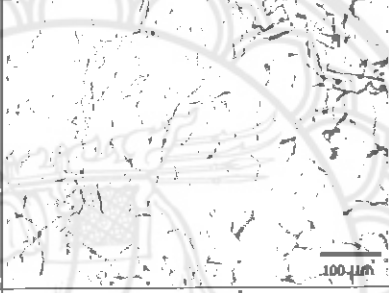
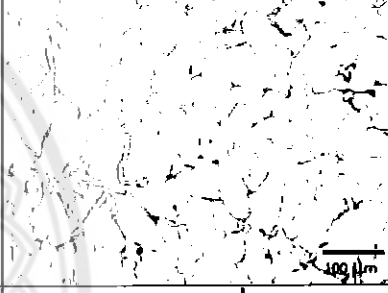
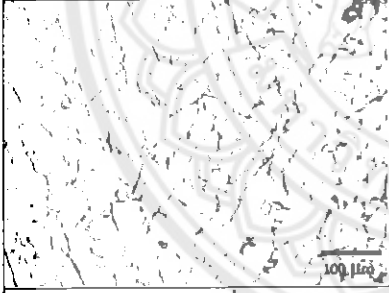

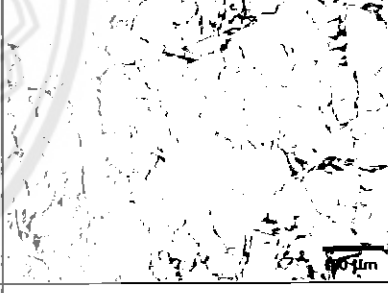
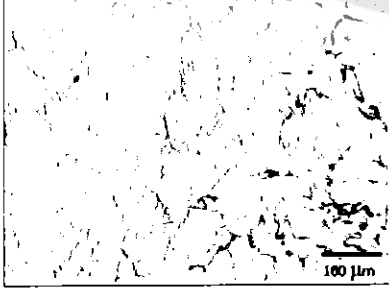
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

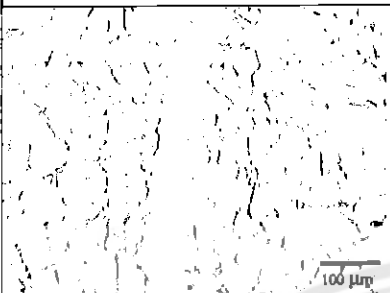
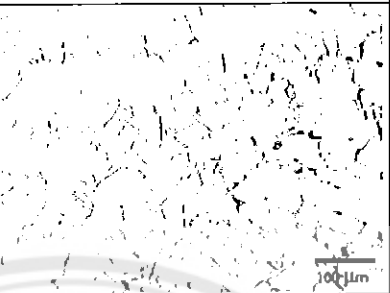
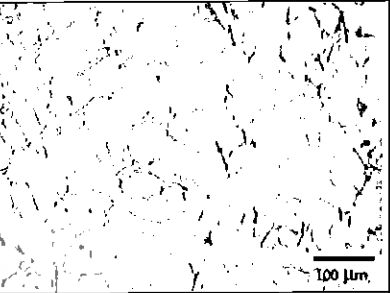
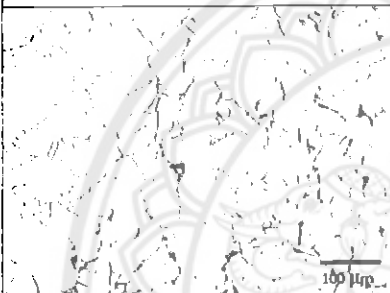
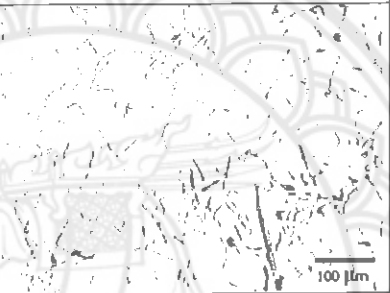
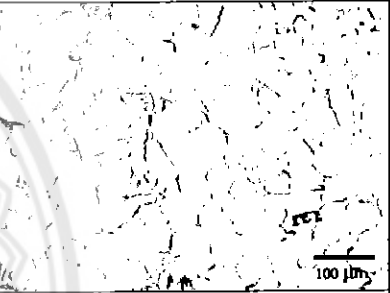
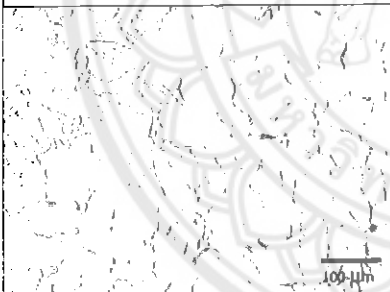
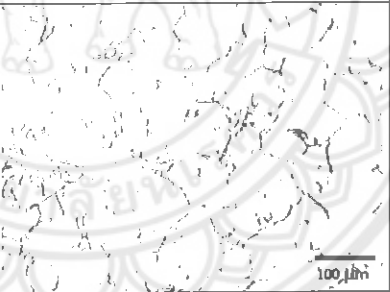
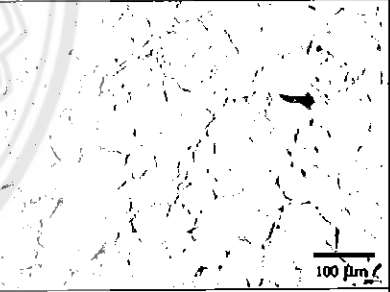
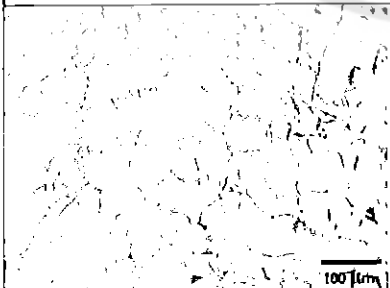
ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

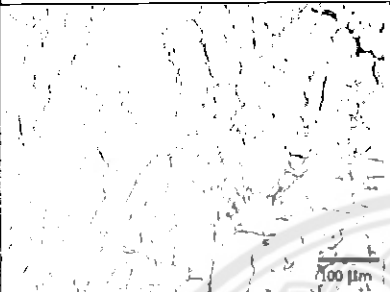

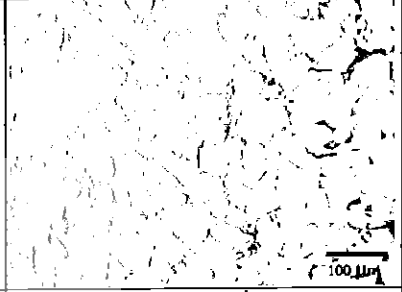
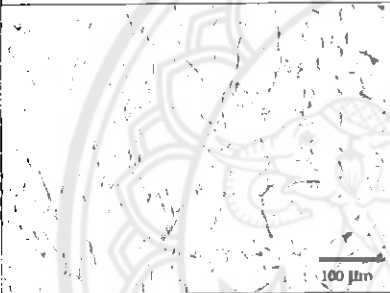
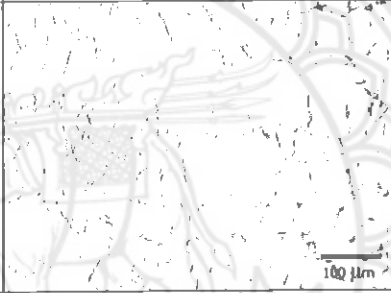
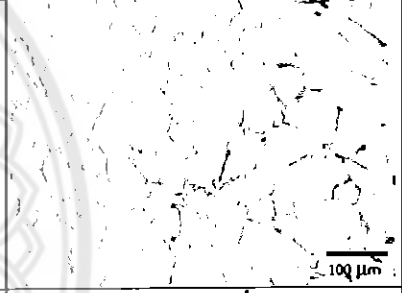
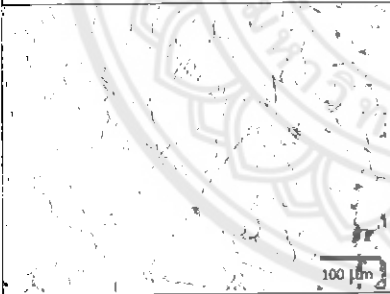
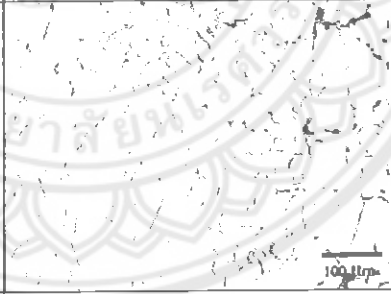
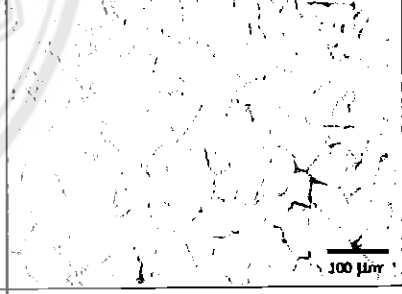
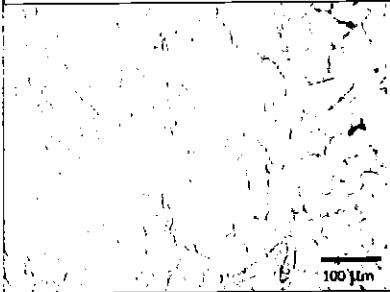
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1
และทำการบ่มแข็ง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

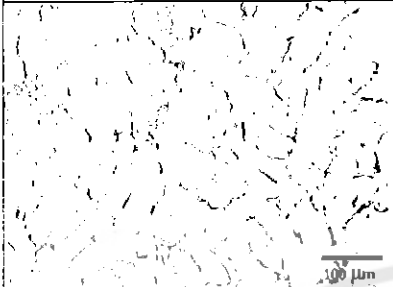
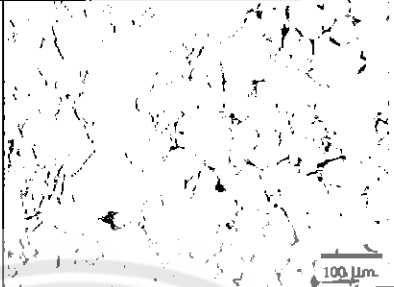
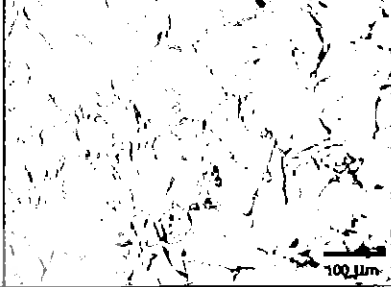

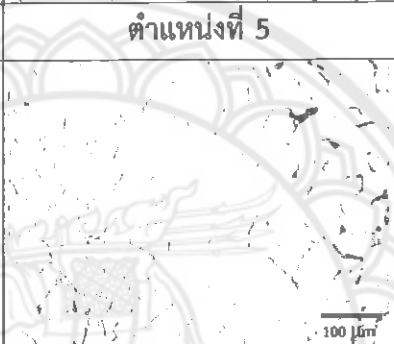
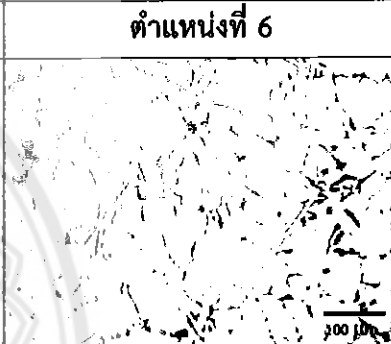
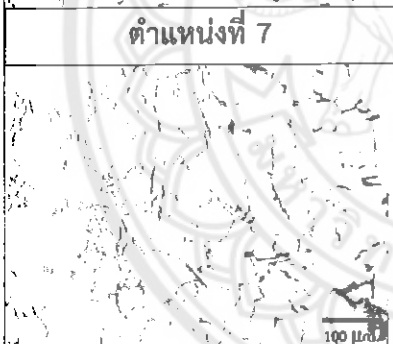
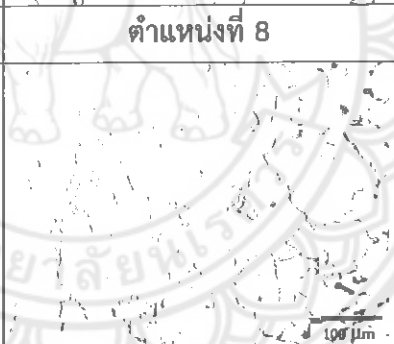
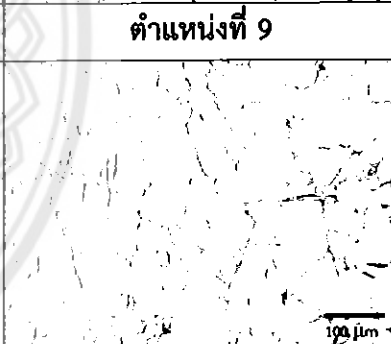
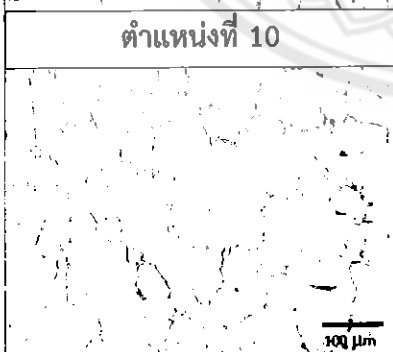
ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1
และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

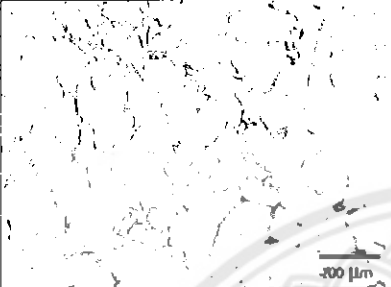
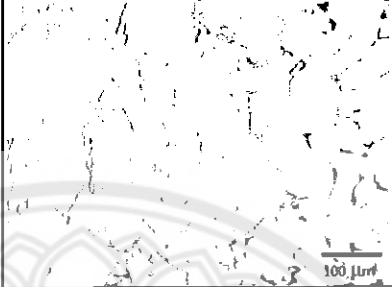
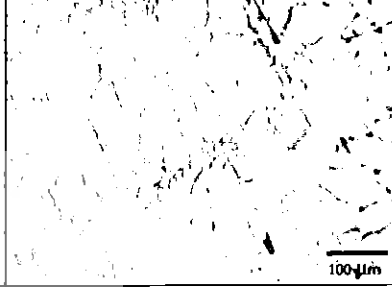
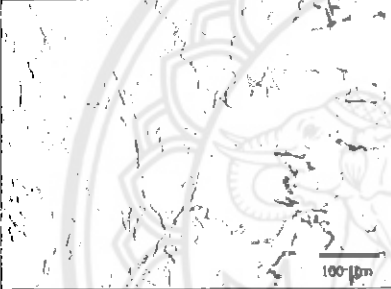

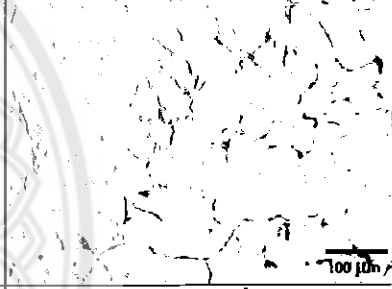
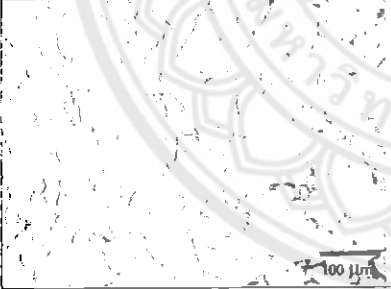

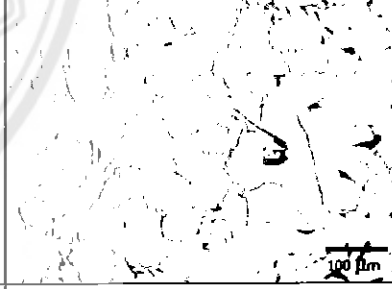
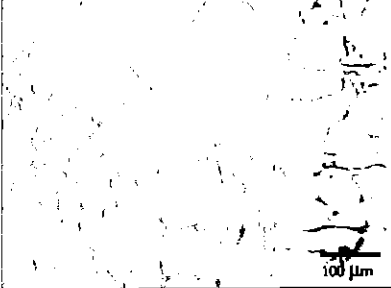
ตารางที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

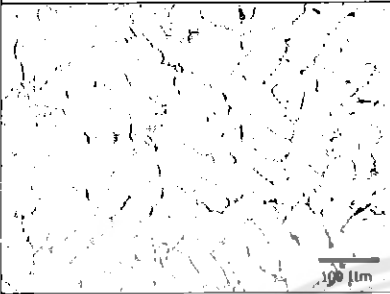
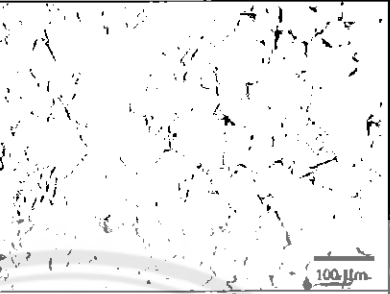
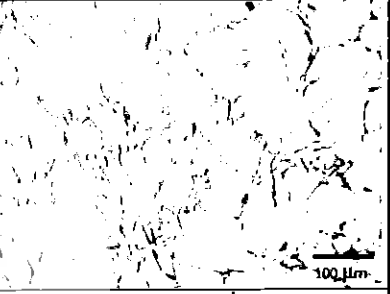
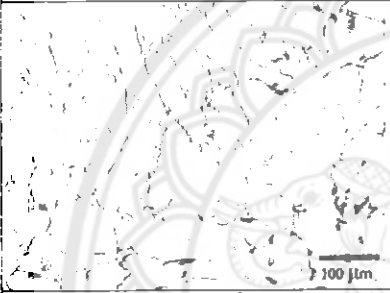
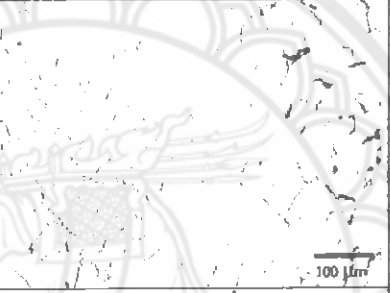
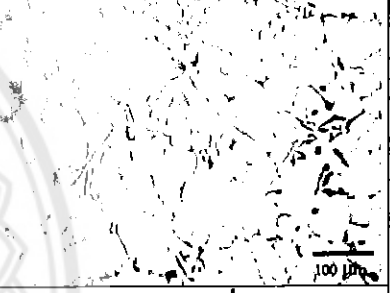
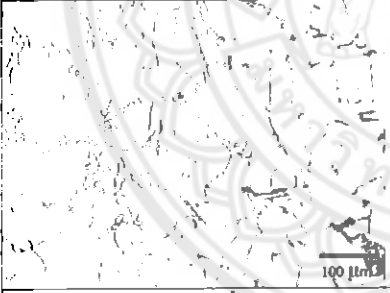
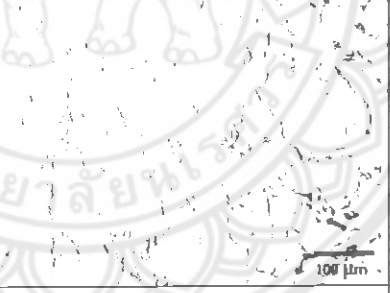
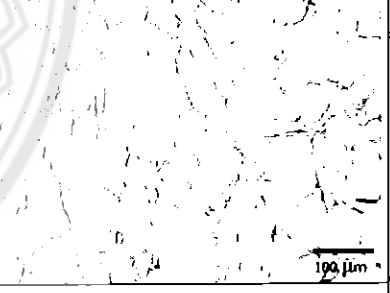
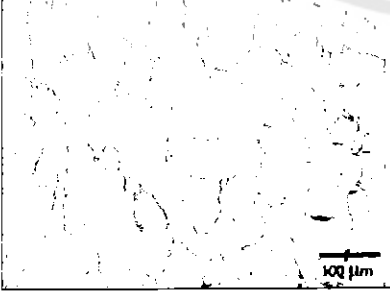
ตารางที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

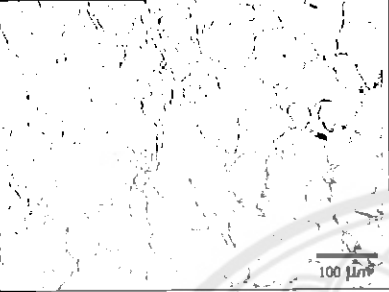
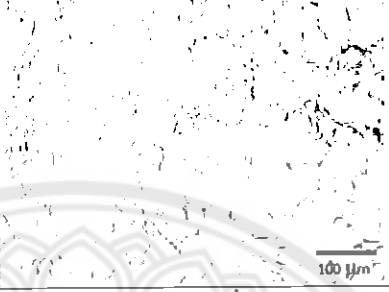
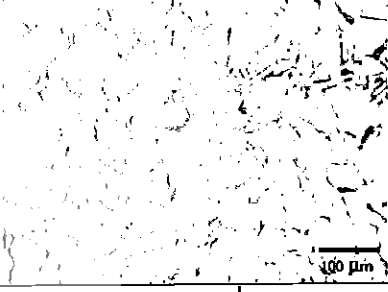
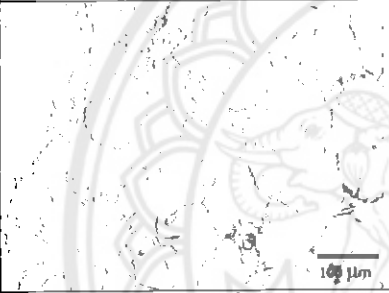
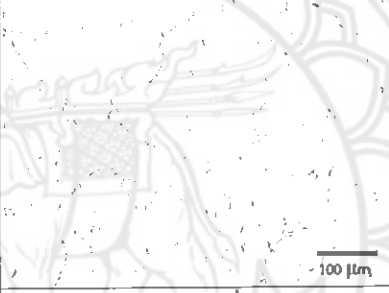
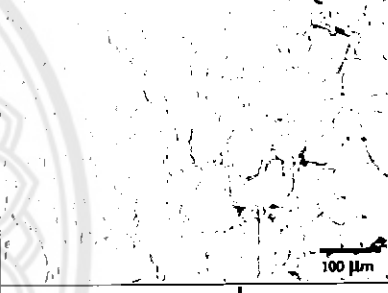
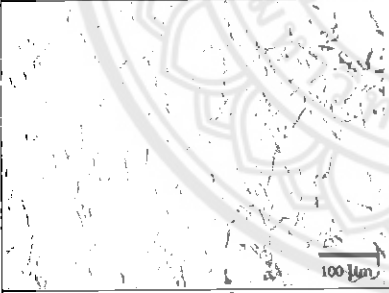

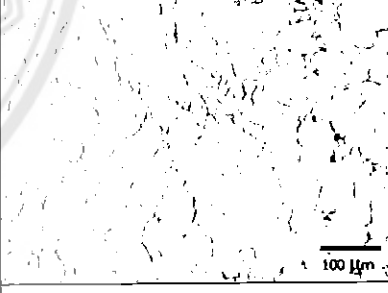
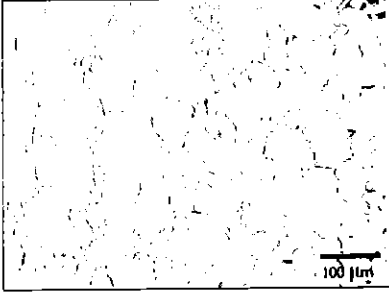
ตารางที่ ก.7 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

ตารางที่ ก.8 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		

ตารางที่ ก.9 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

กำลังขยาย 100 เท่า		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ตำแหน่งที่ 10		
		



จัดทำโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

ตารางที่ ข.1 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
As-Cast	1	13.418
	2	12.174
	3	12.743
	4	13.794
	5	10.903
	6	13.25
	7	11.088
	ค่าเฉลี่ยรวม	12.48
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.14
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	3.96

ตารางที่ ข.2 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr	1	10.164
	2	11.311
	3	10.929
	4	11.313
	5	11.276
	6	10.799
	7	10.222
	ค่าเฉลี่ยรวม	10.86
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.49
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	1.72

ตารางที่ ข.3 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, Aging	1	11.223
	2	10.401
	3	9.576
	4	11.234
	5	9.465
	6	11.184
	7	11.368
	ค่าเฉลี่ยรวม	10.64
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.83
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	2.91

ตารางที่ ข.4 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 510°C-2hr	1	9.617
	2	9.938
	3	9.85
	4	8.382
	5	9.689
	6	8.505
	7	9.789
	ค่าเฉลี่ยรวม	9.40
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.66
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	2.31

ตารางที่ ข.5 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 510°C-2hr, Aging	1	10.511
	2	10.122
	3	9.101
	4	8.354
	5	8.308
	6	9.212
	7	10.308
	ค่าเฉลี่ยรวม	9.42
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.91
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	3.19

ตารางที่ ข.6 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 520°C-2hr	1	10.024
	2	10.076
	3	10.006
	4	7.034
	5	8.493
	6	8.767
	7	7.693
	ค่าเฉลี่ยรวม	8.87
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.22
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	4.27

ตารางที่ ข.7 สกัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 520°C-2hr, Aging	1	9.884
	2	7.909
	3	9.905
	4	8.828
	5	9.441
	6	9.637
	7	8.161
	ค่าเฉลี่ยรวม	9.11
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.82
ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	2.87	

ตารางที่ ข.8 สกัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 530°C-2hr	1	7.954
	2	7.88
	3	7.831
	4	7.575
	5	7.268
	6	7.943
	7	8.325
	ค่าเฉลี่ยรวม	7.83
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.33
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	0.12

ตารางที่ ข.9 สัดส่วนโดยพื้นที่ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 530°C-2hr, Aging	1	10.676
	2	10.078
	3	9.705
	4	9.165
	5	10.16
	6	9.534
	7	9.543
	ค่าเฉลี่ยรวม	9.84
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.5
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	1.75



ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ในสภาพหล่อ

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
As-Cast	1	43
	2	40
	3	31
	4	29
	5	29
	6	37
	7	36
	8	24
	9	30
	10	27
	11	31
	ค่าเฉลี่ยรวม	32.45
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.78
ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	1.05	

ตารางที่ ค.2 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย 1 ครั้ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr	1	37
	2	32
	3	32
	4	34
	5	46
	6	48
	7	42
	8	37
	9	34

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลาย
1 ครั้ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr	10	35
	11	36
	ค่าเฉลี่ยรวม	37.55
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.45
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	0.99

ตารางที่ ค.3 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1
และทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, Aging	1	52
	2	43
	3	46
	4	46
	5	45
	6	47
	7	47
	8	53
	9	43
	10	52
	11	50
	ค่าเฉลี่ยรวม	47.65
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.58
ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	0.65	

ตารางที่ ค.4 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 510°C-2hr	1	44
	2	33
	3	51
	4	43
	5	37
	6	49
	7	39
	8	46
	9	45
	10	48
	11	44
	ค่าเฉลี่ยรวม	43.55
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.39	
ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	0.98	

ตารางที่ ค.5 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 510°C-2hr, Aging	1	47
	2	44
	3	47
	4	43
	5	48
	6	52
	7	49

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 510°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C, 8hr, 510°C-2hr, Aging	8	44
	9	56
	10	57
	11	46
	ค่าเฉลี่ยรวม	48.36
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.84
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	0.88

ตารางที่ ค.6 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 520°C-2hr	1	49
	2	50
	3	44
	4	45
	5	43
	6	42
	7	57
	8	40
	9	38
	10	51
	11	47
	ค่าเฉลี่ยรวม	46
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.5
ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	1.00	

ตารางที่ ค.7 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 520°C-2hr, Aging	1	52
	2	69
	3	57
	4	53
	5	47
	6	51
	7	53
	8	61
	9	61
	10	48
	11	55
	ค่าเฉลี่ยรวม	55.18
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.46	
ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	1.17	

ตารางที่ ค.8 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 530°C-2hr	1	46
	2	50
	3	46
	4	42
	5	47
	6	47

ตารางที่ ค.8 (ต่อ) ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และ การอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 530°C-2hr, Aging	7	53
	8	40
	9	53
	10	44
	11	46
	ค่าเฉลี่ยรวม	46.73
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.07
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	0.74

ตารางที่ ค.9 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และ การอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการ บ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 530°C-2hr, Aging	1	57
	2	49
	3	54
	4	59
	5	53
	6	52
	7	51
	8	54
	9	58
	10	53
	11	45

ตารางที่ ค.9 (ต่อ) ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านการอบละลายครั้งที่ 1 และการอบละลายครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มแข็ง

สภาวะ	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย
ST503°C-8hr, 530°C-2hr,Aging	ค่าเฉลี่ยรวม	53.18
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.07
	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	0.74





เพิ่มข้อมูลมาตรฐาน : Aluminum

Name and formula

Reference code:	01-085-1327
Mineral name:	Aluminum
ICSD name:	Aluminum
Empirical formula:	Al
Chemical formula:	Al

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a:	4.0494
b:	4.0494
c :	4.0494
Alpha :	90.0000
Beta :	90.0000
Gamma :	90.0000

Calculated density (g/cm ³):	2.70
Measured density (g/cm ³):	2.70
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	66.40
Z:	4.00
RIR:	4.10

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
 Mineral
 Alloy, metal or intermetallic
 Corrosion
 Modelled additional pattern

Quality: Calculated (C)

Comments

Additional pattern: See PDF 4-787.
 ICSD collection code: 064700
 Test from ICSD: No R value given.
 At least one TF missing.

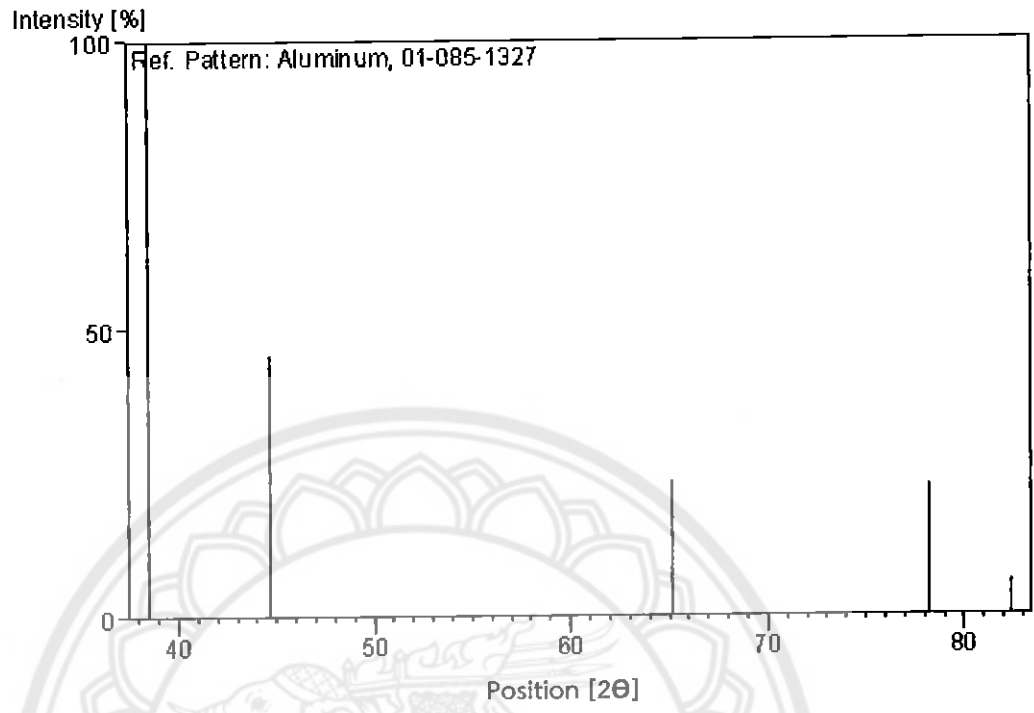
References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)
 Structure: Swanson, H.E., Tatge, E., Natl. Bur. Stand. (U.S.),
 Circ. 539, 359, 1, (1953)

Peak list

No.	h	k	l	d[Å]	2θ [deg]	[%]
1	1	1	1	2.33792	38.475	100.0
2	2	0	0	2.02470	44.723	45.5
3	2	2	0	1.43168	65.101	23.3
4	3	1	1	1.22094	78.234	22.8
5	2	2	2	1.16896	82.441	6.3

Stick Pattern



เพิ่มข้อมูลมาตรฐาน : Silicon

Name and formula

Reference code:	00-005-0565
Mineral name:	Silicon, syn [NR]
ICSD name:	Silicon
Empirical formula:	Si
Chemical formula:	Si

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	22
a :	5.4301
b :	5.4301
c :	5.4301
Alpha :	90.0000
Beta :	90.0000
Gamma :	90.0000
Calculated density (g/cm ³):	2.33
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	160.11
Z:	8.00
RIR:	4.70

Status, subfiles and quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Alloy, metal or intermetallic
Forensic
NBS pattern

Quality: Star (S)

Comments

Deleted by: Deleted by 27-1402, has higher Fn.

Color: Black, gray

Sample source: Sample from Johnson Matthey Company.

Analysis: Spectroscopic analysis: <0.001% Cu, Ag, Zn, Sn,
Mg, Fe.

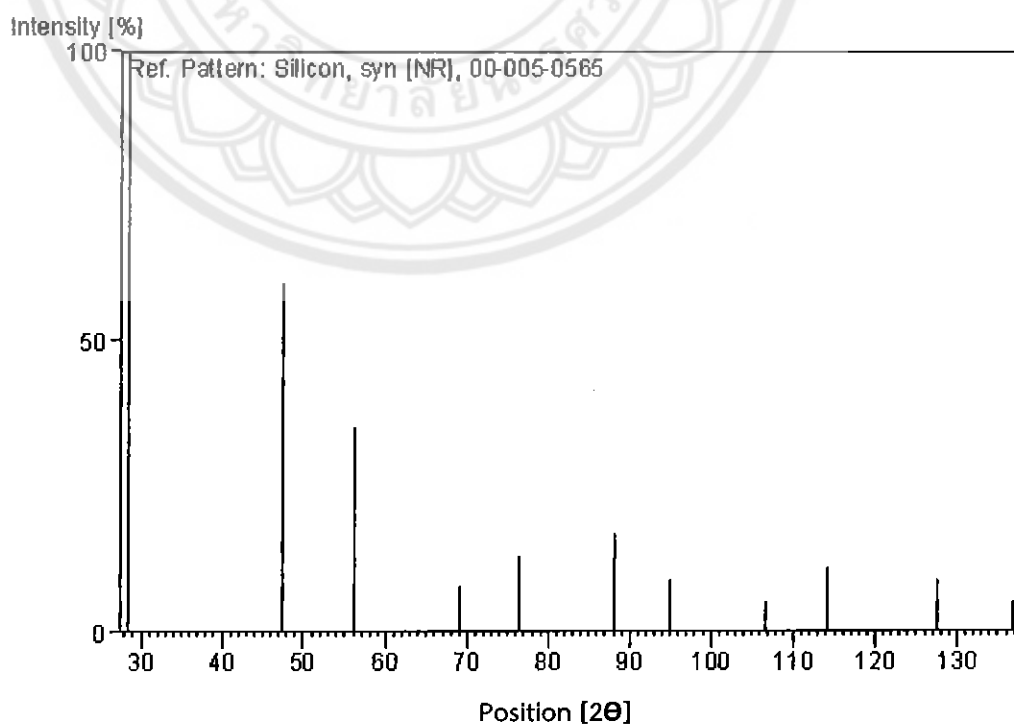
Temperature: X-ray pattern at 26 C.

References

Primary reference: Swanson, Fuyat., Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539,
II, 6, (1953)

Peak list

No.	h	k	l	d[Å]	2 θ [deg]	[%]
1	1	1	1	3.13800	28.420	100.0
2	2	2	0	1.92000	47.306	60.0
3	3	1	1	1.63800	56.103	35.0
4	4	0	0	1.35700	69.173	8.0
5	3	3	1	1.24600	76.372	13.0
6	4	2	2	1.10830	88.059	17.0
7	5	1	1	1.04500	94.975	9.0
8	4	4	0	0.95990	106.735	5.0
9	5	3	1	0.91780	114.130	11.0
10	6	2	0	0.85860	127.574	9.0
11	5	3	3	0.82810	136.933	5.0

Stick Pattern

เพิ่มข้อมูลมาตรฐาน : Aluminum Copper

Name and formula

Reference code:	00-003-1079
PDF index name:	Aluminum Copper
Empirical formula:	Al ₂ Cu
Chemical formula:	Al ₂ Cu

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic Tetragonal
Space group:	Fm-3m I4/mcm
Space group number:	22140
a :	6.0530
b :	6.0530
c :	4.8700
Alpha :	90.0000
Beta :	90.0000
Gamma :	90.0000

Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	178.43
Z:	4.00
RIR:	-

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD
 Subfiles: Inorganic
 Quality: Blank (B)

Comments

Deleted by: see Weissmann February 1954.
 General comments: D-values corrected for absorption.
 Unit cell: Wyckoff gives: a=6.04, c=4.86.

References

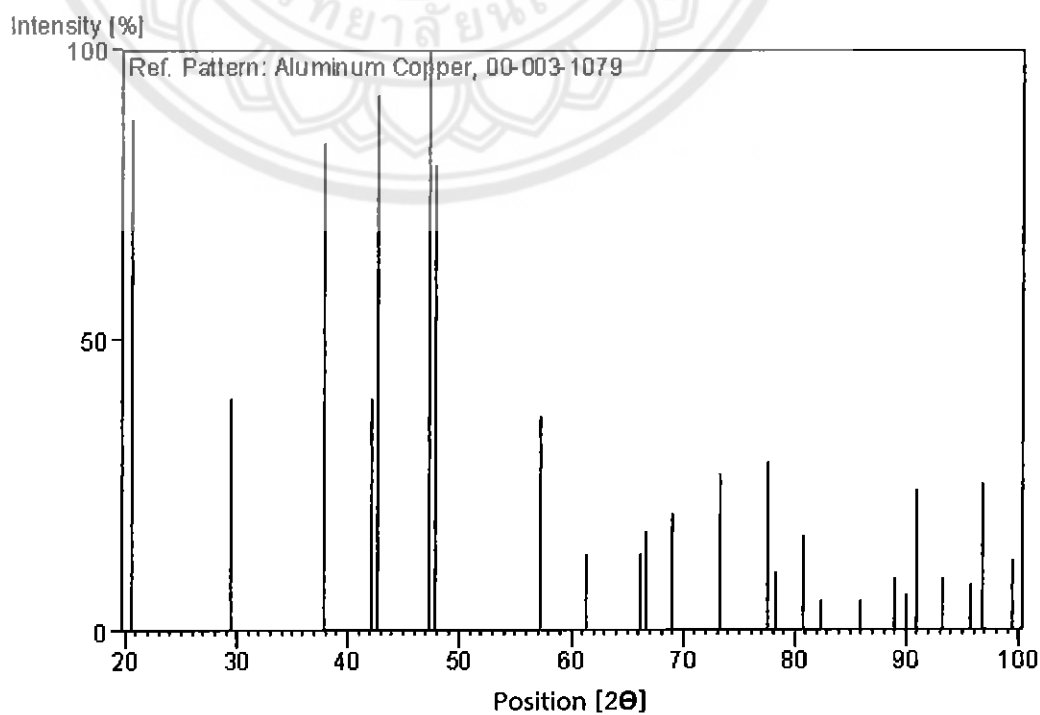
Primary reference: Jette, Westgren, Phragmen., J. Inst. Met., 31, 193, (1924)
 Unit cell: The Structure of Crystals, 1st Ed.
 Powder data: Bradley, Jones., J. Inst. Met., 51, 131, (1933)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ [deg]	I [%]
1	1	1	0	4.29000	20.688	88.0
2	2	0	0	3.04000	29.356	40.0
3	2	1	1	2.38000	37.768	84.0
4	2	2	0	2.14000	42.195	40.0
5	1	1	2	2.12000	42.612	92.0
6	3	1	0	1.92000	47.306	100.0
7	2	0	2	1.90000	47.835	80.0
8	2	2	2	1.61000	57.168	37.0
9	4	0	0	1.51000	61.345	13.0
10	4	1	1	1.41000	66.229	13.0

11				1.40000	66.763	17.0
12	4	2	0	1.36000	68.999	20.0
13	4	0	2	1.29000	73.330	27.0
14	3	2	3	1.23000	77.549	29.0
15	0	0	4	1.22000	78.306	10.0
16	5	1	0	1.19000	80.678	16.0
17	1	1	4	1.17000	82.352	5.0
18	2	0	4	1.13000	85.950	5.0
19	5	2	1	1.10000	88.898	9.0
20	4	1	3	1.09000	89.934	6.0
21				1.08000	90.998	24.0
22	2	2	4	1.06000	93.221	9.0
23	5	3	0	1.04000	95.578	8.0
24	3	1	4	1.03000	96.811	25.0
25	6	0	0	1.01000	99.401	12.0

Stick Pattern



เพิ่มข้อมูลมาตรฐาน : Aluminum Iron Silicon

Name and formula

Reference code: -020-0031
 PDF index name: Aluminum Iron Silicon
 Empirical formula: Al_5FeSi
 Chemical formula: Al_5FeSi

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic Tetragonal Monoclinic
 Space group: P
 a : 6.1200
 b : 6.1200
 c : 41.5000
 Alpha : 90.0000
 Beta : 91.0000
 Gamma : 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 1554.12

Z: 13.40

RIR: -

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD

Subfiles: Inorganic

Alloy, metal or intermetallic

Quality: Doubtful (O)

Comments

Deleted by: Deleted by 49-1499, better pattern, Set 49 dupe review.

General comments: Designated as b phase.

Analysis: Analysis (wt.%): Al 59.3, Fe 27.2, Si 13.3.

References

Primary reference: Munson, Aluminum Laboratories Ltd., Banbury, Oxon, England., Private Communication, (1968)

Unit cell: Phragmen., J. Inst. Met., 77, 489, (1950)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ [deg]	I [%]
1	0	0	8	5.20000	17.038	80.0
2	0	1	7	4.27000	20.786	70.0
3	-1	0	9	3.71000	23.967	10.0
4	1	1	7	3.47000	25.652	5.0
5	1	1	9	3.13000	28.494	5.0
6	0	2	0	3.08000	28.967	30.0
7	1	0	14	2.65000	33.797	5.0
8	-1	1	13	2.58000	34.743	5.0
9	-2	1	6	2.56000	35.023	5.0
10	0	0	19	2.18000	41.385	60.0
11	2	2	2	2.15000	41.989	5.0
12	2	1	13	2.06000	43.917	50.0
13	0	3	2	2.03000	44.600	50.0
14	0	3	5	1.98000	45.790	10.0

15	1	1	19	1.94300	46.713	100.0
16	0	0	22	1.88500	48.240	10.0
17	3	1	12	1.67700	54.688	5.0
18	0	1	24	1.66300	55.187	5.0
19	-3	2	7	1.63700	56.141	5.0
20	-2	3	11	1.55300	59.472	5.0
21	0	0	27	1.53700	60.155	5.0
22	2	2	4	1.38100	67.805	10.0
23	-3	3	9	1.33900	70.238	5.0
24	-4	2	8	1.32800	70.907	5.0
25	1	3	23	1.31600	71.653	5.0
26				1.23700	77.030	10.0
27				1.22300	78.077	10.0
28				1.20800	79.236	5.0

Stick Pattern

