

อิทธิพลของเวลา และอุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติความแข็ง
ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงด้วยกระบวนการตกตะกอนของอนุภาค
ขนาดเล็ก

INFLUENCES OF TIME AND TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND
HARDNESS PROPERTY OF ALUMINIUM-COPPER ALLOYS BY
PRECIPITATION HARDENING

นางสาวจิรัชยา กอบัญญกิจ รหัส 51362343
นางสาวปภาภานต์ ทาเอื้อ รหัส 51362374

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 16945495
เลขเรียกหนังสือ..... ปร.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ๙ ๕24

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ปีการศึกษา 2554



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ อธิพินของเวลา และอุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติความแข็ง
ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงด้วยกระบวนการตกตะกอนของอนุภาค
ขนาดเล็ก

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวจิรัชยา กอบัญญกิจ รหัส 51362343
 นางสาวปภากานต์ ทาเอื้อ รหัส 51362374

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์มานะ วีรวิกรม

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2554

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบรบือ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

.....
.....ที่ปรึกษาร่วมโครงการ
(ดร.ทศพล ตีร์จุริราภาพงศ์)

.....
.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....
.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกัญจน์ ชันส์มฤทธิ)

.....
.....กรรมการ
(อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	อิทธิพลของเวลา และอุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงด้วยกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวจิรัชยา	กอบธัญกิจ	รหัส 51362343
	นางสาวปภาภานต์	ทาเอื้อ	รหัส 51362374
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์มานะ	วีรวิกรม	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง อุณหภูมิ และเวลาบ่มแข็ง ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติความแข็ง ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก โดยนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก มาผ่านขั้นตอนการอบละลายที่อุณหภูมิ 368, 435 และ 506 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 65 นาทีตามลำดับ และชุบน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 และ 40 ชั่วโมง ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อพบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (α -Al Primary) เป็นสีขาว และเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนด์ (θ -CuAl₂) ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม เรียงตัวอยู่ระหว่างขอบเกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้น โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ที่เวลาบ่มแข็ง 25 ชั่วโมง จะมีค่าความแข็งน้อยกว่าเวลาการบ่มแข็ง 40 ชั่วโมง เล็กน้อย ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 120 และ 170 องศาเซลเซียส และให้ค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นค่าความแข็งจะลดลง ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 220 องศาเซลเซียส ในทุกๆ อัตราส่วนผสมของทองแดง

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ทศพล ตริรุจิราภางค์ และอาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในการให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำวิธีการแก้ปัญหา การค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอดจนสามารถทำงานลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ และอาจารย์ธนิภานต์ ธงชัย ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างวิเศษชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ให้ถูกต้องอีกด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถเรียน และทำโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำโครงการนี้จนลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม
นางสาวจิรัชยา กอบธัญกิจ
นางสาวปภาภานต์ ทาเอื้อ

มีนาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)	1
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ	2
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น	4
2.1 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	4
2.2 โลหะอะลูมิเนียม (Aluminium)	5
2.3 โลหะทองแดง (Copper)	5
2.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium Alloys)	6
2.5 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง (Aluminium-Copper Alloys)	8
2.6 การเพิ่มความแข็งของอะลูมิเนียมผสมโดยกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	10
2.7 ผลของอุณหภูมิ และเวลาบ่มแข็งต่อความแข็งของโลหะผสม	14
2.8 กลไกการเพิ่มความแข็ง	16
2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	17
2.10 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)	19
2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)	21
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	26
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ	26
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์	32
4.1 ผลการศึกษาโลหะผสมอลูมิเนียม-ทองแดง ในสภาพหล่อ	32
4.2 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของ อนุภาคขนาดเล็ก	34
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	43
5.1 บทสรุปของโครงการ	43
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา	43
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก ก	47
ภาคผนวก ข	72
ภาคผนวก ค	78
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน	2
2.1 เวลาอบละลายสารละลายของแข็ง และจุ่มน้ำของโลหะผสมอะลูมิเนียม	12
2.2 รายละเอียดน้ำยากัดชิ้นงาน	18
4.1 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิไนด์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนักหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	36
4.2 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1, 2 และ 4 ของทองแดงโดยน้ำหนักหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กที่เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส	37
ก.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	48
ก.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	52
ก.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	56
ก.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง	60
ก.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง	62
ก.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง	65
ก.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง	66
ก.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง	68
ก.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.1 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	73
ข.2 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง	75
ข.3 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง	76
ข.4 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง	77
ค.1 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ (θ - CuAl_2) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง	79
ค.2 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ (θ - CuAl_2) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง	80
ค.3 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ (θ - CuAl_2) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิสมมูลอะลูมิเนียม-ทองแดง	9
2.2 แผนภูมิสมมูล 2 องค์ประกอบของโลหะผสม A และ B ที่มีเทอร์มินอลโซลิดโซลูชัน แอลฟา โดยที่ความสามารถในการละลายของ B ใน A จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง	11
2.3 กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	14
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่บ่ม แข็งอุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูง	14
2.5 กราฟแสดงเส้นโค้งการบ่มแข็ง (ความแข็งแรง และความแข็งกับเวลา) ที่อุณหภูมิหนึ่งของ โลหะผสมที่สามารถทำกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	15
2.6 แผนภาพการเกิดชั้นตอนต่างๆ ก่อนกลายเป็นเฟสตะกอน (θ) สมดุล	16
2.7 โครงสร้างพื้น และลักษณะการเกิดตะกอน	17
2.8 ลักษณะแนวทางการขีดผิวของชิ้นงานที่ทดสอบสลับเป็นตาราง	18
2.9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	20
2.10 การวัดความแข็งแบบบริเนล	22
2.11 แสดงการแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน	26
3.2 ชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการกลึง และตัดแล้ว	27
3.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดย น้ำหนัก ทำการการอบละลายเป็นเวลา 65 นาที	28
3.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดย น้ำหนัก ทำการบ่มแข็ง เป็นเวลา 25 ชั่วโมง	29
3.5 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดย น้ำหนัก ทำการบ่มแข็ง เป็นเวลา 40 ชั่วโมง	30
3.6 ภาพวาดตำแหน่งที่ใช้ทดสอบความแข็ง	31
4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ	33
4.2 ร้อยละโดยพื้นที่เฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทอง แดงในสภาพหล่อ	33
4.3 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ	34
4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของ อนุภาคขนาดเล็ก	35
4.5 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม- ทองแดงในสภาพหล่อ และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	39
4.7 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ ทั้งความแข็งแรง ทนต่อการผุกร่อน และมีน้ำหนักเบา จึงมีการพัฒนาการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากโลหะผสมอะลูมิเนียมแทนชิ้นส่วนจากเหล็ก ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเข้ามามีบทบาท และความสำคัญต่องานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร โดยทั่วไปมักพบปัญหาในด้านคุณภาพของชิ้นงานหล่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งความแข็งแรงนั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ส่วนใหญ่เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่ามีเกรนกระจายตัวของทองแดงในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอ ทำให้ความแข็งแรงลดลง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (Precipitation Hardening) จึงถูกนำมาใช้กับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง โดยอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ดังนั้นโครงการนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร และผ่านกรรมวิธีการทางความร้อนโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก โดยปรับเปลี่ยนส่วนผสมของทองแดง อุณหภูมิ และเวลาในการบ่มแข็ง จากการศึกษาโครงการนี้จะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การผลิต และการนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง อุณหภูมิ และเวลาในการบ่มแข็ง ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรง ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

โครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสม อุณหภูมิ และเวลาในการบ่มแข็งต่างกัน หลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสม อุณหภูมิ และเวลาในการบ่มแข็งต่างกัน หลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก และโลหะผสม (Nonferrous Metals and Alloys)

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก หมายถึงโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม สังกะสี ดีบุก และอื่นๆ ในงานวิศวกรรม และอุตสาหกรรมปริมาณการใช้โลหะนอกกลุ่มเหล็กมีปริมาณที่ต่ำกว่าโลหะกลุ่มเหล็ก ปริมาณการผลิตทั้งปีจะอยู่ในเกณฑ์ประมาณหนึ่งในสิบห้า ส่วนของเหล็กหล่อ และเหล็กกล้า ทั้งนี้ไม่นับรวมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่จัดอยู่ในประเภทโลหะมีค่า (Precious Metal) เช่น ทองคำ เงิน และทองคำขาว โลหะนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้ในงานวิศวกรรมส่วนใหญ่จะใช้ทดแทนเหล็กในกรณีที่โลหะนอกกลุ่มเหล็กมีความสามารถเหนือกว่าเหล็กโดยพิจารณาจากหลายๆ ประเด็นที่สำคัญคือ (มวีส, 2543)

2.1.1 ความง่ายต่อการผลิตชิ้นส่วนโลหะ

โลหะนอกกลุ่มเหล็กส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีสมบัติการไหลภายในแบบหล่อสูง (High Fluidity) สามารถที่จะทำการหล่อได้ทั้งแบบหล่อทราย หรือแบบหล่อโลหะในลักษณะการฉีดเข้าแบบหล่อ (Die Casting) จากสมบัติที่อ่อนตัวสูง (Malleable) ขึ้นรูปได้ง่ายของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ทั้งแบบร้อน และแบบเย็นโดยกรรมวิธีขึ้นรูปต่างๆ เช่น การหล่อ (Casting) การรีด การตีขึ้นรูป การเชื่อม นอกจากนั้นการตกแต่งด้วยการตัด กลึง เจาะ สามารถทำได้ง่าย

2.1.2 สมบัติต้านทานการกัดกร่อน

โลหะนอกกลุ่มเหล็กหลายประเภทมีสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กทั้งในบรรยากาศทั่วไปที่มีความชื้น และในสภาวะที่เป็นกรด หรือด่าง

2.1.3 สภาพที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า และความร้อน

โลหะนอกกลุ่มเหล็กมีทั้งที่เป็นตัวนำที่ดี และไม่ได้อยู่ในกลุ่ม ดังเช่น ทองแดงจัดเป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เหมาะสำหรับทำสายไฟฟ้า แต่โลหะนิกเกิลผสม (Nickel Alloys) จัดเป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี เหมาะสำหรับทำขดลวดต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistor)

2.1.4 น้ำหนัก หรือความถ่วงจำเพาะ

โลหะนอกกลุ่มเหล็กหลายประเภทมีน้ำหนักเบากว่าเหล็กมาก เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ไททาเนียม ความได้เปรียบในด้านน้ำหนักจะเป็นประเด็นหนึ่งที่พิจารณา เพื่อนำเอาโลหะเหล่านี้มาพัฒนาใช้ในกรณีที่ต้องการชิ้นส่วนโลหะที่มีน้ำหนักเบา

2.1.5 ความสวยงามของสีล้น

เป็นปัจจัยหนึ่งที่นำเอาโลหะนอกกลุ่มเหล็กซึ่งให้สี และความมันเงาของผิวมาใช้งานในด้านการตกแต่ง และงานสถาปัตยกรรม

2.2 โลหะอะลูมิเนียม (Aluminium)

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางแทนเหล็ก และทองแดงในหลายๆ ด้านของงานทางวิศวกรรม และอุตสาหกรรม อะลูมิเนียมมีสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่าย มีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูง ข้อเสียของอะลูมิเนียมมีอยู่บ้าง โดยเฉพาะอะลูมิเนียมมีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขต (มันส์, 2543)

2.2.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

2.2.1.1	น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight)	26.97 มวลอะตอม
2.2.1.2	ระบบผลึก (Crystal Structure)	ลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face-Centered Cubic)
2.2.1.3	ความหนาแน่น (Density) (20 องศาเซลเซียส)	2700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
2.2.1.4	อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature)	660 องศาเซลเซียส
2.2.1.5	จุดเดือดกลายเป็นไอ (Boiling Point)	1800 องศาเซลเซียส
2.2.1.6	ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (Latent Heat of Fusion)	93 แคลอรีต่อกรัม

2.2.2 สมบัติทางกล (Mechanical Properties)

2.2.2.1	ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)	40×10^6 - 180×10^6 นิวตันต่อตารางเมตร
2.2.2.2	พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)	29.43×10^6 นิวตันต่อตารางเมตร
2.2.2.3	อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	ร้อยละ 40-45
2.2.2.4	ความแข็ง (Hardness)	16-20 HB
2.2.2.5	โมดูลัสการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	65×10^9 นิวตันต่อตารางเมตร

2.3 โลหะทองแดง (Copper)

ทองแดงจัดเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ต่ำ แม้จะมีความเหนียวสูงก็ตาม การใช้งานของทองแดงจึงมีขอบเขตจำกัดอยู่เฉพาะกรณีเท่านั้น การปรับปรุงสมบัติทางกลของทองแดงทำได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปเย็น (Cold-Working) การเพิ่มความแข็งด้วยวิธีจัดการเรียงตัวของอะตอม (Ordering Hardening) การทำสารละลายของแข็ง (Solid-Solution Formation) และกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (Precipitation Hardening) ซึ่งแต่ละวิธีสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับทองแดงได้มาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีเฉพาะ และการผสมธาตุต่างๆ วิธีการทำสารละลายของแข็งโดยการผสมธาตุต่างๆ ลงไปในทองแดงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เมื่อ

เปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ดังนั้น จึงเกิดโลหะผสมทองแดงหลายชนิด และมีสมบัติทางกลแตกต่างกัน ออกไปทำให้สามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงาน (มนัส, 2543)

2.3.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

2.3.1.1 น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight)	63.57 มวลอะตอม
2.3.1.2 ระบบผลึก (Crystal Structure)	ลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face-Centered Cubic)
2.3.1.3 ความหนาแน่น (Density) (20 องศาเซลเซียส)	8940 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
2.3.1.4 อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature)	1083 องศาเซลเซียส
2.3.1.5 จุดเดือดกลายเป็นไอ (Boiling Point)	2595 องศาเซลเซียส
2.3.1.6 ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (Latent Heat of Fusion)	0.092 แคลอรีต่อกรัม

2.3.2 สมบัติทางกล (Mechanical Properties)

2.3.2.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)	$200 \times 10^6 - 360 \times 10^6$ นิวตันต่อตารางเมตร
2.3.2.2 พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)	98.1×10^6 นิวตันต่อตารางเมตร
2.3.2.3 อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	ร้อยละ 35-50
2.3.2.4 ความแข็ง (Hardness)	35-50 HB
2.3.2.5 โมดูลัสการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	125×10^9 นิวตันต่อตารางเมตร

2.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium Alloys)

โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา ทั้งนี้เพราะโลหะผสมอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงสูง สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ ทนทานต่อการเกิดสนิม และการกัดกร่อนในบรรยากาศได้ดี แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรด และด่าง ทาสีได้ง่าย และราคาไม่แพงมากนัก (พยูร, 2523) โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถจำแนกประเภทออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ (แมน, 2544)

2.4.1 โลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought Aluminium Alloys)

โลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทนี้สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการแปรรูปทางกล เช่น การรีดขึ้นรูปเป็นแผ่น หรือเป็นแท่ง โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้นรูปสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ

2.4.1.1 กลุ่มที่ไม่สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Non Heat Treatable)

โลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้นรูปกลุ่มที่ไม่สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้นี้ ไม่สามารถนำมาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กได้ แต่

สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบเย็นได้เท่านั้น โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมี 3 กลุ่มย่อยด้วยกันคือ

ก. โลหะผสม 1xxx โลหะผสมชนิดนี้ประกอบด้วยอะลูมิเนียมอย่างน้อยร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก และมีเหล็ก และซิลิคอนเป็นสิ่งเจือปนหลัก ถ้ามีการเติมทองแดงร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก จะทำให้โลหะผสมชนิดนี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็นพิเศษ

ข. โลหะผสม 3xxx แมงกานีสจะเป็นธาตุผสมหลักในโลหะผสมกลุ่มนี้ และทำให้อะลูมิเนียมแข็งแรงขึ้นโดยวิธีการทำเป็นสารละลายของแข็งเท่านั้น โลหะผสมที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ 3003 ซึ่งเป็นโลหะผสม 1100 ที่ถูกเติมด้วยแมงกานีสร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนัก

ข. โลหะผสม 5xxx แมกนีเซียมจะเป็นธาตุผสมหลักในโลหะผสมกลุ่มนี้ และจะถูกเติมเพื่อทำให้แข็งแรงขึ้นได้มากถึงร้อยละ 5

2.4.1.2 กลุ่มที่สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatable)

กลุ่มที่สามารถผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โลหะผสมอะลูมิเนียมบางชนิดจะสามารถผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กได้ แบ่งเป็น 3 กลุ่มย่อยด้วยกันคือ

ก. โลหะผสม 2xxx ธาตุผสมหลักในโลหะผสมกลุ่มนี้คือ ทองแดง แต่แมกนีเซียมอาจจะถูกเติมลงไปด้วย นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ บางชนิดที่อาจถูกเติมลงไปปริมาณเล็กน้อย โลหะผสมที่สำคัญกลุ่มนี้คือ 2024 ซึ่งประกอบด้วยทองแดงร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และแมงกานีสร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก โลหะผสมกลุ่มนี้จะถูกทำให้แข็งแรงขึ้นโดยการทำเป็นสารละลายของแข็ง และกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

ข. โลหะผสม 6xxx ธาตุผสมหลักในโลหะผสมกลุ่มนี้คือ แมกนีเซียม และซิลิคอน ซึ่งจะรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบ Mg_2Si เกิดเป็นตะกอนทำให้โลหะผสมในกลุ่มนี้แข็งแรงขึ้น

ค. โลหะผสม 7xxx ธาตุผสมหลักในโลหะในโลหะผสมกลุ่มนี้คือ สังกะสี แมกนีเซียม และทองแดง สังกะสี และแมกนีเซียมจะรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบ $MgZn_2$ เกิดเป็นตะกอนที่ทำให้โลหะผสมในกลุ่มนี้แข็งแรงขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของสังกะสี และแมกนีเซียมในอะลูมิเนียมค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของสังกะสี และแมกนีเซียมในอะลูมิเนียมค่อนข้างสูง

2.4.2 โลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทหล่อ (Cast Aluminium Alloys)

โลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทนี้เป็นโลหะผสมที่ผ่านการหล่อขึ้นรูป โดยมีธาตุผสมที่สำคัญ ได้แก่ ทองแดง และซิลิคอน เนื่องจากทองแดงช่วยเพิ่มความแข็งแรง ส่วนซิลิคอนเพิ่มความสามารถในการไหล และต้านทานการแตกร้าวของงานหล่อได้ดี โดยปกติโลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถหล่อได้ 3 วิธีคือ

2.4.2.1 การหล่อด้วยแม่พิมพ์ทราย (Sand Casting)

การหล่อด้วยแม่พิมพ์ทรายเป็นวิธีการหล่ออะลูมิเนียมที่ง่ายที่สุด สำหรับการหล่อด้วยแม่พิมพ์ทรายมักเลือกใช้ในกรณีที่

- ก. ปริมาณการผลิตน้อย
- ข. การหล่อมีความสลับซับซ้อน

ค. การหล่อชิ้นงานใหญ่

ง. การหล่องานโครงสร้าง

2.4.2.1 การหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold)

การหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวรโลหะหลอมเหลวจะถูกเทลงแม่พิมพ์ถาวรภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วง ความดันต่ำ ละใช้เพียงแรงดันเพียงเท่านั้น การหล่อด้วยวิธีแม่พิมพ์ถาวรนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเกรนที่ละเอียดกว่า และมีความแข็งแรงมากกว่าการหล่อด้วยวิธีแม่พิมพ์ทราย และถ้ายังทำให้ชิ้นงานที่หล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวรเย็นลงอย่างรวดเร็วก็จะทำให้ได้โครงสร้างเกรนที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น การหดตัว และการเป็นรูพรุน เนื่องจากแก๊ส (Gas Porosity) น้อยกว่าการหล่อด้วยแม่พิมพ์ทราย แต่ข้อเสียคือ แม่พิมพ์ถาวรนี้มีขนาดที่จำกัด ดังนั้นถ้าชิ้นงานที่มีความสลับซับซ้อนมากๆ ก็ยากที่จะหล่อด้วยวิธีนี้ได้

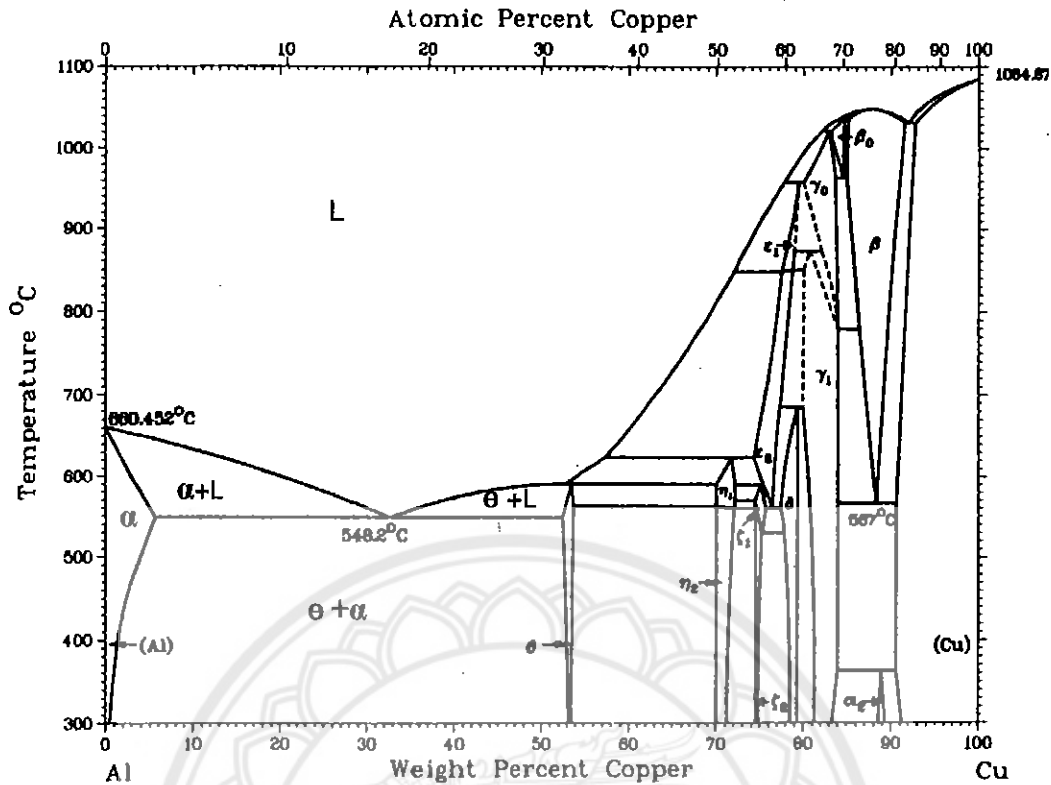
2.4.2.3 การหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวรโดยใช้แรงดัน (Die Casting)

การหล่อวิธีนี้เหมาะสมกับการผลิตที่ต้องการอัตราการผลิตสูง โดยการอัดโลหะที่หลอมเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยความดัน แม่พิมพ์ทั้งสองส่วนจะถูกยึดติดกันให้แน่นเพื่อทนต่อความดันสูง โลหะผสมอะลูมิเนียมที่หลอมเหลวจะถูกป้อนใส่เข้าไปในแม่พิมพ์ เมื่อโลหะแข็งตัวแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออก และชิ้นงานที่หล่อเสร็จแล้วจะถูกนำออก หลังจากนั้นแม่พิมพ์จะถูกยึดติดกันอีกครั้งเพื่อการผลิตครั้งต่อไป ข้อดีของวิธีการหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวรโดยใช้แรงดันนี้คือ

- ก. ชิ้นงานมีความสมบูรณ์ และอัตราการผลิตสูง
- ข. ขนาดของชิ้นงานมีความแม่นยำ
- ค. พื้นผิวของชิ้นงานเรียบ
- ง. การเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้โครงสร้างเกรนที่ละเอียด
- จ. กระบวนการผลิตง่ายต่อการทำให้เป็นระบบอัตโนมัติ

2.5 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง (Aluminium-Copper Alloys)

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็นลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (FCC) เหมือนกับอะลูมิเนียม ทองแดงจึงสามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม และส่งผลให้สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส ทองแดงละลายในอะลูมิเนียมในรูปของสารละลายของแข็ง เฟส α โดยทองแดงสามารถละลายได้สูงสุดปริมาณร้อยละ 5.65 โดยน้ำหนัก และปริมาณทองแดงที่ละลายในเฟส α จะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 548 องศาเซลเซียส เหลือปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แสดงผังแผนภูมิสมดุล (Phase Diagram) รูปที่ 2.1 ที่สัดส่วนผสมทองแดงร้อยละ 54 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมจะรวมกับทองแดงให้สารประกอบเชิงโลหะ มีสูตรเป็น CuAl_2 หรือเรียกว่าเฟส θ มีระบบผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Complex Tetragonal) มีความแข็งปานกลาง และเปราะแตกง่าย (Brittle) ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงเท่ากับร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ทองแดงยังสามารถรวมกับอะลูมิเนียมเป็นสารประกอบ CuAl_2 เรียกว่าเฟส η_2



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม-ทองแดง
ที่มา: Metals Handbook (1948)

จากแผนภูมิสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.1 จุดยูเทกติก (Eutectic) ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส ณ อัตราส่วนผสมร้อยละ 33 โดยน้ำหนักทองแดง มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยายูเทกติกคือ เมื่อโลหะผสมหลอมเหลวเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส จะแตกตัวให้เฟส α (มีทองแดงร้อยละ 5.65 โดยน้ำหนัก) กับเฟส θ หรือ CuAl_2 (มีทองแดงร้อยละ 52.75 โดยน้ำหนัก)

โครงสร้างของยูเทกติกจะประกอบด้วยแถบบางๆ ระหว่างเฟส α และเฟส θ สลับกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงในเกณฑ์สูง ลักษณะคล้ายกับโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ในเหล็กกล้าคาร์บอน

ระบบโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงสามารถออกเป็น 2 ประเภท คือไฮโปยูเทกติก หมายถึงโลหะผสมที่มีปริมาณธาตุผสมต่ำกว่าส่วนผสมที่จุดยูเทกติก และไฮเปอร์ยูเทกติก หมายถึงโลหะผสมที่มีปริมาณธาตุผสมสูงกว่าส่วนผสมที่จุดยูเทกติก โดยโครงสร้างไฮโปยูเทกติก ในที่นี้จะแยกเป็นสองลักษณะคือ ไฮโปยูเทกติกเกินร้อยละ 5 ของทองแดงโดยน้ำหนัก และต่ำกว่าร้อยละ 5 ของทองแดงโดยน้ำหนัก

โครงสร้างไฮโปยูเทกติกที่ส่วนผสมเกินร้อยละ 5 ของทองแดงโดยน้ำหนัก ในสภาพการเย็นตัวอย่างสมดุล โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส α เป็นโครงสร้างพื้นฐานโดยมีลักษณะโครงสร้างยูเทกติก ($\alpha+\theta$) กระจุกกระจายอยู่ตามบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) ซึ่งส่งผลทำให้ความเหนียวลดลง

สำหรับโครงสร้างไฮโปยูเทกติกที่มีส่วนผสมน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักทองแดง มีลักษณะโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟส α เป็นโครงสร้างพื้นฐาน อาจจะปรากฏการตกผลึกของเฟส θ อยู่บ้างบริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของอะตอมทองแดงมาจับตัวเป็นเฟส θ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 548 องศาเซลเซียส เฟส α กับเฟส θ มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-

ทองแดงเป็นอย่างมาก เนื่องจากเฟส α เป็นเฟสที่มีความเหนียวสูง ในขณะที่เฟส θ มีความแข็งสูงแต่เปราะ ในกรณีเช่นนี้ ถ้าเฟส θ ปรากฏอยู่เพียงเล็กน้อยในสภาพต่อเนื่องเป็นโครงข่าย (Network) จะส่งผลให้โลหะผสมขาดสมบัติความเหนียว หากเปรียบเทียบก็จะเหมือนเอาเม็ดทรายผสมในซีเมนต์ ทรายที่ซีเมนต์ยังสามารถหุ้มเม็ดทรายได้หมดก็ยังคงรักษาความเป็นซีเมนต์ไว้ได้ แต่ถ้าซีเมนต์ไม่สามารถหุ้มเม็ดทรายอยู่ได้ก็จะขาดความเหนียวอย่างเห็นได้ชัด (มนัส, 2541)

อัตราการเย็นตัวของโลหะผสมจากสภาพหลอมเหลว จึงเป็นปัจจัยกำหนดลักษณะโครงสร้างและสมบัติเชิงกล การทำให้เฟส θ เกิดขึ้นในลักษณะฝังแทรกอยู่ในเฟส α แบบไม่ต่อเนื่องกัน จะทำให้สมบัติความเหนียวของโลหะผสมไม่ลดลง

ในกรณีที่โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ไกล่ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก โครงสร้างของโลหะผสมก็จะมีเฟส θ ในปริมาณมากกว่าเฟส α เป็นผลให้โลหะผสมนี้มีความเหนียว และความแข็งแรงน้อยมาก จนไม่มีประโยชน์ในการใช้งานทางวิศวกรรม

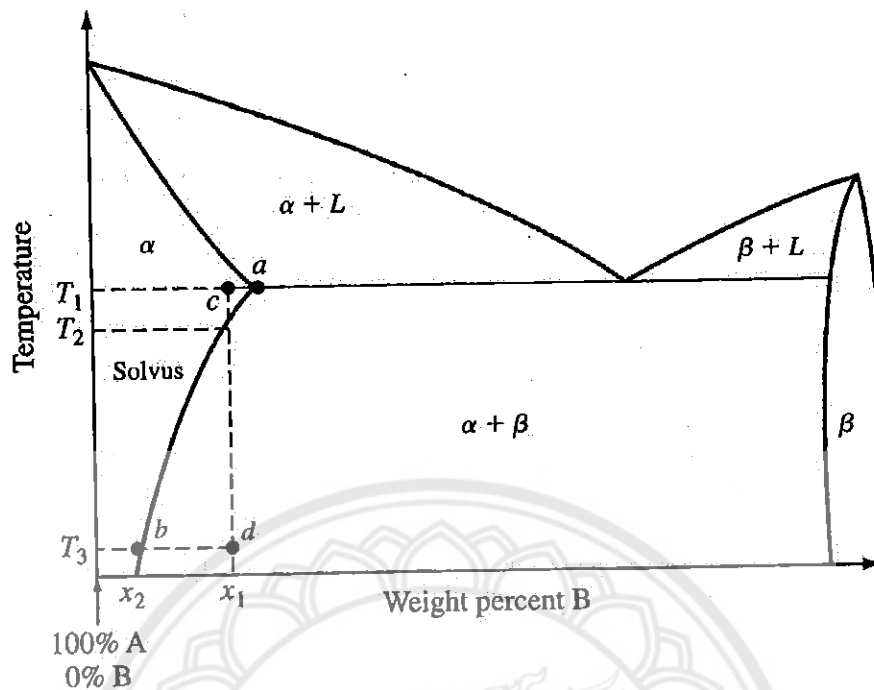
เมื่อกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างไฮโปยูเทคติกที่ปรากฏเฟส θ ในสภาพที่ต่อเนื่องกันตามบริเวณขอบเกรน โดยทั่วไปมักจะเกิดขึ้นกับโลหะผสมที่ผ่านงานหล่อด้วยแบบทราย (Sand Casting) และสามารถปรับปรุงคุณภาพความเหนียวให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง ให้เฟส θ สลายตัว อะตอมของทองแดงจะละลายกลับไปเป็นสารละลายของแข็ง α หรือไม่ก็อาจจะปรับรูปร่างกลายเป็นเม็ดกลมกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างจุลภาค จากนั้นนำไปทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำซึ่งไม่เปิดโอกาสให้เฟส θ เกิดขึ้นได้ทัน ทำให้ได้เฟส α ที่มีทั้งความแข็งแรง และความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ดี

การทำให้เฟส θ ตกผลึกในเฟส α ภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งจะส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เรียกว่า กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (มนัส, 2541) ดังอธิบายในรายละเอียดของกรรมวิธีทางความร้อนโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในหัวข้อที่ 2.6

2.6 การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีทางความร้อนโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กของโลหะผสมในระบบโลหะผสม 2 ธาตุ (Binary Alloys) มีวัตถุประสงค์คือการทำให้อนุภาคขนาดเล็ก เกิดการตกตะกอน และกระจายตัวอย่างหนาแน่นในเนื้อโลหะผสมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน อนุภาคขนาดเล็ก ที่ตกตะกอนออกมาเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการนี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

โลหะผสมที่สามารถทำการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ได้จะต้องเป็นโลหะผสมในระบบเทอร์มินอลโซลิดโซลูชัน (Terminal Solid Solution) ที่มีความสามารถในการละลายของธาตุหนึ่งในอีกธาตุหนึ่งลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง แสดงดังแผนภูมิสมดุลรูปที่ 2.2 แสดงถึงความสามารถในการละลายในเทอร์มินอลโซลิดโซลูชันแอลฟา จะลดลงจากจุด a ไป b ตามแนวเส้นโซลิวัส (Solvus)



รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุล 2 องค์ประกอบของโลหะผสม A และ B ที่มีเทอร์มินอลโซลิดโซลูชันแอลฟา โดยที่ความสามารถในการละลายของ B ใน A จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

ที่มา: แม้น (2544)

เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กของโลหะผสมที่มีองค์ประกอบ X_1 ในแผนภูมิสมดุล แสดงดังรูปที่ 2.2 จะพบว่าโลหะผสมที่มีองค์ประกอบ X_1 มีความสามารถในการละลายของสารละลายของแข็งแอลฟาตกลงมาก ที่อุณหภูมิจากตำแหน่ง T_2 ไปยัง T_3 กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ประกอบด้วยขั้นพื้นฐาน 3 ขั้นตอนคือ

2.6.1 การอบละลายสารละลายของแข็ง (Solution Heat Treatment)

เป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ขั้นตอนนี้โลหะผสมซึ่งอาจจะเป็นโลหะผสมที่ผ่านกระบวนการตี หรือหล่อก็ตาม จะถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างเส้นโซลิวส และโซลิดัส (Solidus) หลังจากนั้นจะทิ้งไว้ที่อุณหภูมินั้นจนมีโครงสร้างสม่ำเสมอ อุณหภูมิ T_1 จุด c แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เลือกใช้ในกรณีนี้ เพราะเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างโซลิวส และโซลิดัสของสารละลายของแข็งแอลฟา (แม้น, 2544)

โดยทั่วไปการอบละลายสารละลายของแข็งในเชิงพาณิชย์นั้น จะเลือกอุณหภูมิที่อบละลายสารละลายของแข็งมีค่าน้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน แต่อุณหภูมิจะขึ้นกับส่วนประกอบของโลหะผสมนั้นด้วย และกำหนดให้อุณหภูมิอบละลายนั้น ± 6 องศาเซลเซียส จากเส้นโซลิวส (ASM Handbook, 1990)

2.6.2 การชุบน้ำ (Quenching)

เป็นขั้นตอนที่สองในกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ตัวอย่างถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วลงมาอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ตัวกลางที่ใช้ในการทำให้เย็นตัวลงมักจะเป็นน้ำ โครงสร้างของโลหะผสมหลังจากการชุบน้ำประกอบด้วยสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) สำหรับในกรณีของโลหะผสมที่มีองค์ประกอบ X_1 นั้น โครงสร้างหลังจากการชุบน้ำจนถึงอุณหภูมิ T_3 ที่จุด d แสดงดังรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดของธาตุ B ในเฟสแอลฟา (แม้น, 2544)

ตารางที่ 2.1 เวลาอบละลายสารละลายของแข็ง และชุบน้ำของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ความหนา, มิลลิเมตร (นิ้ว)	เวลาอบละลาย (นาที)				เวลาชุบน้ำมากที่สุด (วินาที)
	เตาอบอากาศ (Air furnace)		เตาอบเกลือ (Salt bath)		
	น้อยสุด	มากที่สุด	น้อยสุด	มากที่สุด	
≤0.41 (0.016)	20	25	10	15	5
0.51 (0.020)	20	30	10	20	7
0.64 (0.025)	25	35	15	25	7
0.81 (0.032)	25	35	15	25	7
1.02 (0.040)	30	40	20	30	10
1.27 (0.050)	30	40	20	30	10
1.35 (0.053)	30	40	20	30	10
1.80 (0.071)	35	45	25	35	10
2.03 (0.080)	35	45	25	35	10
2.29 (0.090)	35	45	25	35	10
2.54 (0.100)	40	55	30	45	15
3.18 (0.125)	40	55	30	45	15
4.06 (0.160)	50	60	35	45	15
4.57 (0.180)	50	60	35	45	15
6.35 (0.250)	55	65	35	45	15
>6.35 (0.250)-12.7 (0.500)	65	75	45	55	15
มากกว่า 12.7	+30	+30	+20	+20	

ที่มา: ASM Handbook (1990)

2.6.3 การบ่มแข็ง (Aging)

เป็นขั้นตอนที่สามในกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ขั้นตอนการบ่มแข็งของตัวอย่างโลหะผสมหลังจากอบละลายสารละลายของแข็ง และชุบน้ำแล้ว เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะจะทำให้เกิดการตกตะกอนกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของ

กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ตะกอนละเอียดที่เกิดขึ้นในโลหะผสมนี้จะช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในระหว่างการใช้งาน ส่งผลให้โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กนี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (แม้น, 2544) การบ่มแข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีดังต่อไปนี้

2.6.3.1 การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural Aging)

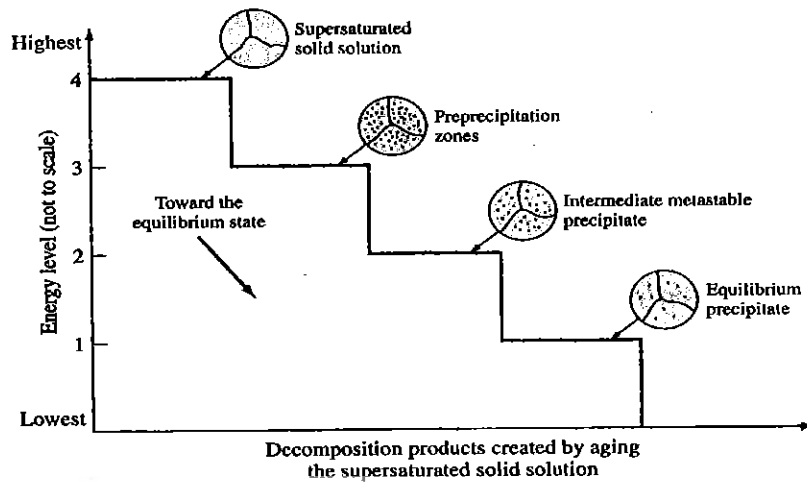
การบ่มแข็งธรรมชาติ หมายถึงการเพิ่มความแข็งแรงวัสดุโดยการทิ้งวัสดุไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหนึ่ง โลหะที่บ่มแข็งด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่ทำในโลหะผสมกลุ่ม 2xxx และ 6xxx โดยประกอบด้วยการทำเป็นสารละลายของแข็ง ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว และปล่อยให้เกิดการตกตะกอนเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึง ความเหนียว และสามารถต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น โลหะผสมที่จะเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีนี้ เมื่อถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วแล้ว จะต้องมียะตอมละลายอยู่อย่างอิ่มตัวยิ่งยวด เพื่อให้เกิดการตกตะกอนได้ทันที ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน และตะกอนนั้นจะเริ่มเข้าสู่ภาวะเสถียรภายในระยะเวลา 4-5 วัน (ASM Handbook, 1990)

2.6.3.2 การบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging)

การบ่มแข็งเทียม หมายถึงการเพิ่มความแข็งแรงวัสดุโดยการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อุณหภูมิหนึ่งในระยะเวลาที่กำหนด โลหะผสมอะลูมิเนียมส่วนใหญ่ต้องอาศัยความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องในการเกิดตะกอน โดยโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีปริมาณทองแดงร้อยละ 1-4.5 ของทองแดงโดยน้ำหนัก โดยทั่วไปจะบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 120-220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-45 ชั่วโมง เพื่อให้การตกตะกอนที่เกิดในระหว่างการบ่มแข็งมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ส่วนความแข็งแรงสุดท้ายที่ต้องการขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่ำกับเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง ดังนั้นจึงต้องนำเวลาในการบ่มแข็งมาพิจารณาด้วยเสมอ นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาถึงระบบของโลหะผสมที่ใช้ด้วย (ASM Handbook, 1990)

โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กแล้ว ในขั้นแรกจะอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ในสภาวะนี้โลหะผสมจะมีพลังงานสูงมาก ที่ระดับพลังงานเท่ากับ 4 แสดงดังรูปที่ 2.3 โลหะผสมจะไม่เสถียร และมีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดไปเป็นเฟสที่มีพลังงานต่ำกว่าซึ่งอาจจะเป็นเฟสกึ่งเสถียร (Metastable Phase) หรือเฟสสมดุล (Equilibrium Phases) อื่น

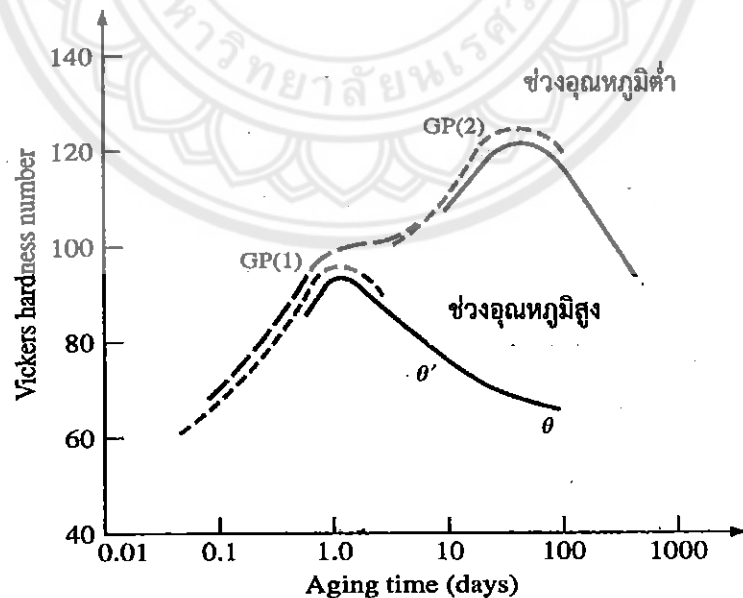
เมื่อโลหะผสมที่อยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดถูกบ่มที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีพลังงานกระตุ้นค่อนข้างน้อย อะตอมจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า บริเวณการตกตะกอน (Precipitation Zone) สำหรับในกรณีของโลหะผสม A-B บริเวณเฟสแอลฟาแสดงดังรูปที่ 2.2 จะมีปริมาณอะตอมของ B มากกว่า A แสดงดังในระดับพลังงาน 3 รูปที่ 2.3 และถ้ายังคงทำการบ่มแข็งต่อไป หรือมีพลังงานมากขึ้นเพียงพอโดยการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งบริเวณช่วงการตกตะกอนนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น (Intermediate Metastable Precipitation) ซึ่งอยู่ในระดับพลังงาน 2 แสดงดังรูปที่ 2.3 และหากยังคงมีการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงต่อไป หรือมีพลังงานกระตุ้นสูงขึ้นอนุภาคที่ตกตะกอนเหล่านี้จะเปลี่ยนเป็นเฟสที่มีความเสถียร และสมดุล (Equilibrium Precipitation) มากขึ้นในระดับพลังงาน 1 แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก
ที่มา: แม้น (2544)

2.7 ผลของอุณหภูมิ และเวลาบ่มแข็งต่อความแข็งของโลหะผสม

ผลของอุณหภูมิต่อความแข็ง ในช่วงการบ่มแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง โดยกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก จะเกิดการตกตะกอน 4 ลักษณะตามลำดับดังนี้ โซน GP1, โซน GP2 (เฟส θ'), เฟส θ' และเฟส θ เฟสเหล่านี้จะไม่ได้เกิดขึ้นเสมอในช่วงอุณหภูมิในการบ่มแข็ง กล่าวคือ โซน GP1 และโซน GP2 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยที่เฟส θ' และเฟส θ จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูง

ที่มา: แม้น (2544)

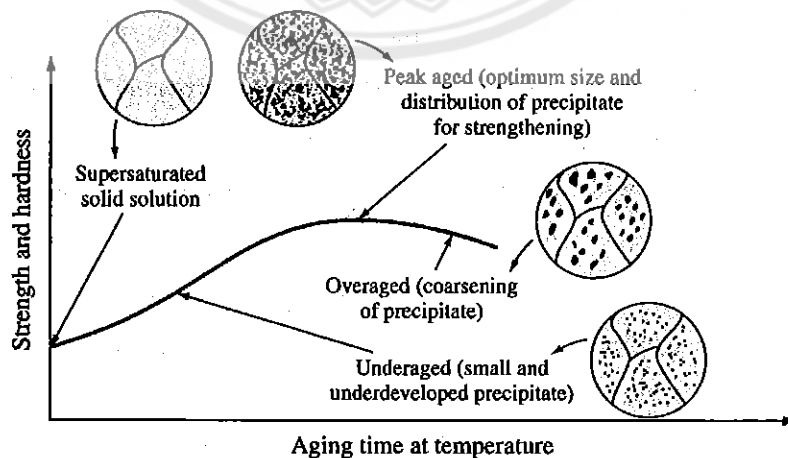
โซน GP1 โซนการตกตะกอนนี้เกิดที่อุณหภูมิในการบ่มแข็งต่ำ และเกิดการจับตัวกันของอะตอมของทองแดงในสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวด โซน GP1 นี้จะประกอบด้วยบริเวณที่มีการจับตัวในรูปของแผ่นกลม (Disk) และเนื่องจากอะตอมของทองแดงจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าอะตอมของอะลูมิเนียม โซน GP1 กล่าวได้ว่าเป็นโครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์กับโครงผลึกเนื้อพื้น เนื่องจากอะตอมของทองแดงเพียงแค่นั้นที่อะตอมของอะลูมิเนียมในโครงผลึก

โซน GP2 หรือเฟส โซนเหล่านี้มีโครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์กับโครงผลึกเนื้อพื้นเหมือนกันกับโซน GP1 แต่ขนาดของตะกอนจะมีขนาดใหญ่ การขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจึงมากกว่าโซน GP1 ทำให้โซน GP2 นี้ค่าความแข็งที่มากกว่าโซน GP1

เฟส θ' เฟสนี้จะเกิดนิวเคลียเซชันแบบวิวิธพันธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนดิสโลเคชัน และจะมีโครงผลึกตะกอนเป็นแบบอินโคฮีเรนต์กับโครงผลึกเนื้อพื้น (โครงผลึกตะกอนแบบอินโคฮีเรนต์เป็นตะกอนที่อนุภาคจะมีโครงสร้างที่แตกต่างแยกออกจากโครงผลึกเนื้อพื้น) ทำให้การขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง

เฟส θ เฟสสมดุล θ นี้ เป็นเฟสอินโคฮีเรนต์ และมีองค์ประกอบ CuAl_2 เกิดมาจากเฟส θ' หรือ จากโครงผลึกเนื้อพื้นโดยตรง ทำให้การขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเช่นกัน

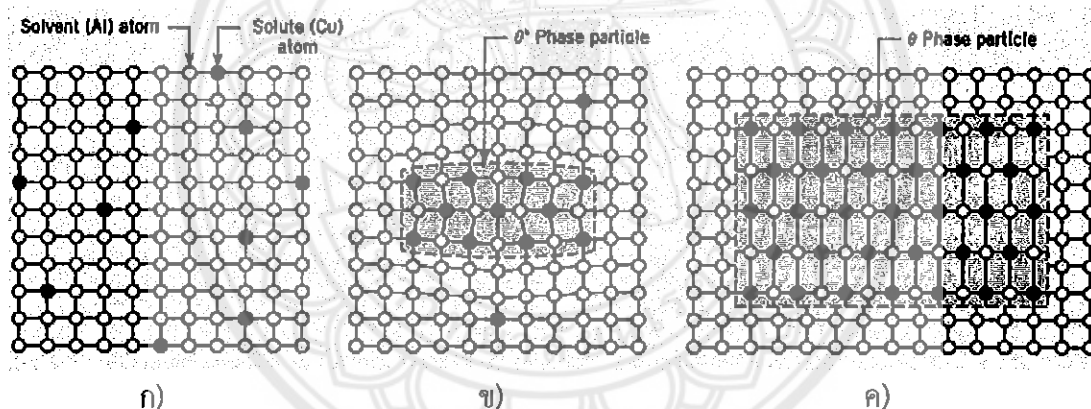
ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อความแข็งของโลหะผสมที่ผ่านขั้นตอนการอบเป็นสารละลายของแข็ง และชุบน้ำ สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้งการบ่มแข็ง (Aging Curve) กราฟของเส้นโค้งการบ่มแข็งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง และความแข็งกับเวลาในการบ่มแข็ง (Aging Time) ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ แสดงดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าความแข็งของสารละลายของแข็งอิมิตัวยิ่งยวดจะเท่ากับจุดตัดบนแกน X ที่เวลาเท่ากับศูนย์จะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น การตกตะกอนจะเริ่มเกิดขึ้น และขนาดของตะกอนก็จะค่อยๆ ใหญ่ขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นมีความแข็งเพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่เวลาในการบ่มแข็งนานเพียงพอ ในช่วงนี้จะเกิดเป็นช่วงเหมาะสมของการตกตะกอน และถ้าการบ่มแข็งยังคงดำเนินต่อไปช่วงการตกตะกอนจะเริ่มหยาบขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นจะเริ่มมีความแข็งลดลง (แม้น, 2544)



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงเส้นโค้งการบ่มแข็ง (ความแข็งแรง และความแข็งกับเวลา) ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ของโลหะผสมที่สามารถทำกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก
ที่มา: แม้น (2544)

2.8 กลไกการเพิ่มความแข็ง

กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กนิยมใช้กับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง แม้ว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมหลายชนิดมีส่วนผสมของหลายธาตุต่างกัน แต่กลไกการเพิ่มความแข็งโดยกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กนิยมศึกษาอย่างกว้างขวางในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง แผนภูมิสมดุลโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยแสดงเฉพาะส่วนที่มีอะลูมิเนียมผสมมาก หรือเฟส α ซึ่งจัดเป็นสารละลายแบบแทนที่ของทองแดงในอะลูมิเนียม และมีสารประกอบเชิงโลหะ CuAl_2 หรือเฟส θ เกิดขึ้นด้วย แต่ระหว่างการตกตะกอนนั้นจะมีเฟสซึ่งไม่เสถียร แสดงดังรูปที่ 2.6 ข) เกิดขึ้นก่อน และจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสสมดุล θ แสดงดังรูปที่ 2.6 ค) ดังนั้นสมบัติทางกลจะได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของอนุภาคเหล่านี้ ในระหว่างการอบชุบช่วงแรก (เวลาที่สั้นมาก) อะตอมทองแดงจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มย่อย (Cluster) มีรูปร่างแผ่นบางเล็กๆ โดยแผ่นบางนี้จะเกิดทุกแห่งในเฟส α กลุ่มย่อยนี้บางครั้งเรียกว่าโซน (zone) มีขนาดเล็กมากซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าไม่ใช่อนุภาคตะกอน แต่เมื่อเวลาผ่านไป ทองแดงจะแพร่มารวมกันทำให้โซนเหล่านี้กลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ อนุภาคเหล่านี้จะเกิดเป็นเฟสที่ไม่เสถียร (θ' และ θ'') ก่อนกลายเป็นเฟสสมดุล θ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพการเกิดขึ้นตอนต่างๆ ก่อนกลายเป็นเฟสตะกอน (θ) สมดุล

ก) สารละลายของแข็งอิมิตัวอิงยวดย

ข) อนุภาคของเฟสที่ไม่เสถียร (θ')

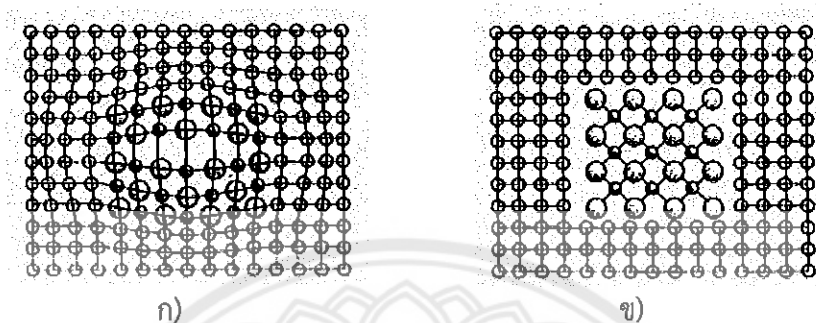
ค) เฟสสมดุล θ ในเนื้อพื้น α

ที่มา: แม้น (2544)

การทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงในระดับที่เหมาะสมที่สุด จะต้องทำให้โครงสร้างเนื้อพื้น และโครงสร้างตะกอนจะมีลักษณะโคฮีเรนต์ (Coherent) แสดงดัง รูปที่ 2.7 ก) หรือมีลักษณะเป็นแบบเซมิโคฮีเรนต์ (Semi-Coherent) และมีการกระจายตัวของตะกอนอย่างสม่ำเสมอ ชิ้นงานจะมีความเค้นสูงเป็นพิเศษ เพราะดิสโลเคชันเคลื่อนที่ผ่านตะกอนลักษณะดังกล่าวได้ยาก ความเครียดที่เกิดจากแรงเค้นจึงสูง ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีขนาดประมาณ 10-100 นาโนเมตร (มนัส, 2541)

การบ่มแข็งนานขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง เรียกว่า การบ่มนานเกินพอดี (Overaging) โดยตะกอนละเอียดจะลดลง แล้วแทนที่ด้วยอนุภาคที่หยาบ โดยมีการแยกกันชัดเจนระหว่างโครงสร้าง

เนื้อพื้นกับผิวของตะกอน แสดงดังรูปที่ 2.7 ข) ซึ่งจะแสดงโครงผลึกตะกอนที่ไม่เกิดความต่อเนื่องกัน มีลักษณะอินโคฮีเรนต์ (Incoherent) กับโครงผลึกเนื้อพื้น และมีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งอาจเป็นเพราะช่องว่างระหว่างอะตอมที่เพิ่มขึ้น และจำนวนตะกอนลดลง สมบัติทางกลจึงลดลง (Pearce, 2002)



รูปที่ 2.7 โครงผลึกเนื้อพื้น และลักษณะการเกิดตะกอน

ก) ลักษณะตะกอนแบบโคฮีเรนต์

ข) ลักษณะตะกอนแบบอินโคฮีเรนต์

ที่มา: Askeland (1994)

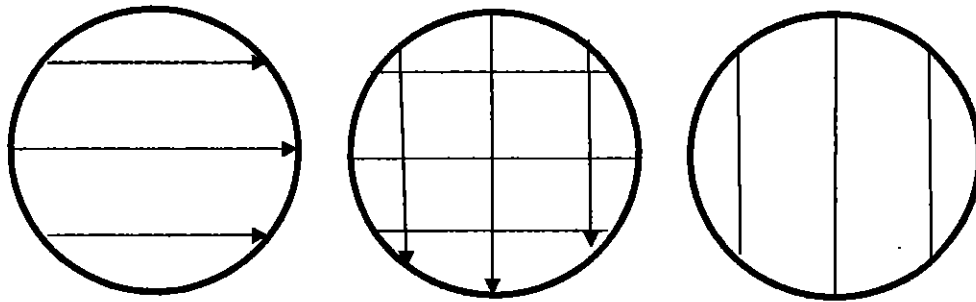
2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) คือ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึง รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรน แต่โลหะเป็นวัสดุที่บการศึกษารูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรนนั้นจึงต้องตัดชิ้นงาน แล้วนำไปขัดกัดกรด โดยกรดจะกัดตามขอบเกรน แล้วขอบเกรนจะถูกกัดเป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรน และขอบเกรนหันเหออกนอกทิศทางเดิม จึงสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ โดยทั่วไปมักใช้กำลังขยาย 200 เท่า หรือมากกว่าในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (ชวลิต, 2553)

2.9.1 การขัดผิวของชิ้นงาน

ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220 320 400 และขัดจนถึงเบอร์ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนพื้นหนาเรียบแล้วขัดผิวของชิ้นงานที่จะตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่ขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดผิวของชิ้นงานไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ขั้นตอนการขัดแสดงดังรูปที่ 2.8

ทิศทางการขีดครั้งที่ 1 ทิศทางการขีดครั้งที่ 2 เมื่อขีดเสร็จรอยขีดครั้งที่ 1 จะหายไป



รูปที่ 2.8 ลักษณะแนวทางการขีดผิวของชิ้นงานที่ทดสอบสลับเป็นตาราง
ที่มา: ขวลิขิต (2542)

2.9.2 การขีดผิวของชิ้นงานด้วยผงขีด (การขีดละเอียด)

การขีดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขีดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยผงขีดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide) โดยผงขีดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 1 และ 0.3 ไมครอน การขีดด้วยผงขีดนี้จะต้องขีดบนงานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขีดผสมกับน้ำเทลงบนผ้าสักหลาดแล้วขีดผิวจนเป็นมัน

2.9.3 การกัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลาย

ชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขีดจนเป็นมันแล้วจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปกัดด้วยสารละลาย ซึ่งการใช้สารละลายนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ โลหะผสมอะลูมิเนียมจะใช้น้ำยากัดชิ้นงานแสดงดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดน้ำยากัดชิ้นงาน

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
1. กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก $\frac{1}{2}$ – 2 มิลลิลิตรผสม	โลหะผสมอะลูมิเนียม	จุ่ม หรือ เช็ดด้วยสำลี นาน 15-45 วินาที
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)	น้ำ 100 มิลลิลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	โลหะผสมอะลูมิเนียม	เช็ดด้วยสำลีนาน 10-15 วินาที

ที่มา: ขวลิขิต (2542)

2.10 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แสงแสดงดังรูปที่ 2.9 มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สามารถช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดได้สูงสุดในระดับของช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตร เท่านั้น (หรือที่ดัดที่สุดในช่วงระดับความละเอียด 200-400 นาโนเมตร) (วิรุธ, 2553)

2.10.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แสง

2.10.1.1 ฐานกล้อง (Base) เป็นส่วนที่ใช้วางบนโต๊ะ ทำหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดมีรูปร่างสี่เหลี่ยม หรือวงกลม ที่ฐานจะมีปุ่มสำหรับปิดเปิดไฟฟ้า

2.10.1.2 แขนกล้อง (Arm) เป็นส่วนเชื่อมลำกล้องกับฐานใช้เป็นที่จับเวลาจะเคลื่อนย้ายกล้องจุลทรรศน์

2.10.1.3 ลำกล้อง (Body Tube) เป็นส่วนที่ปลายด้านบนมีเลนส์ตา ส่วนปลายด้านล่างติดกับเลนส์วัตถุ ซึ่งติดกับแผ่นหมุนได้ เพื่อเปลี่ยนเลนส์ขนาดต่างๆ ติดอยู่กับจานหมุน

2.10.1.4 ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse Adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยนระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลำกล้อง หรือแทนวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน

2.10.1.5 ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine Adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพ ให้ได้ภาพชัดเจนมากขึ้น

2.10.1.6 เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) เป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้แผ่นสไลด์ หรือวัตถุปกติติดกับแป้นวงกลมซึ่งมีประมาณ 3-4 อัน แต่ละอันมีกำลังบอกเอาไว้ เช่น 3.2x, 4x, 10x, 40x และ 100x เป็นต้น ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ

2.10.1.7 เลนส์ใกล้ตา (Eye Piece) เป็นเลนส์อยู่บนสุดของลำกล้อง โดยทั่วไปจะมีกำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ

2.10.1.8 เลนส์รวมแสง (Condenser) ทำหน้าที่รวมแสงให้เข้มข้นเพื่อส่งไปยังวัตถุ

2.10.1.9 กระจกเงา (Mirror) ทำหน้าที่สะท้อนแสงจากธรรมชาติ หรือแสงจากหลอดไฟภายในห้องให้ส่องผ่านวัตถุโดยทั่วไปกระจกเงามี 2 ด้าน โคนด้านหนึ่งเป็นกระจกเงาเว้า อีกด้านเป็นกระจกเงาระนาบ สำหรับกล้องรุ่นใหม่ๆ จะใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งสะดวก และชัดเจนกว่า

2.10.1.10 ไดอะแฟรม (Diaphragm) อยู่ใต้เลนส์รวมแสงทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงให้เข้าสู่เลนส์ในปริมาณที่ต้องการ

2.10.1.11 แทนวางวัตถุ เป็นแท่นใช้วางแผ่นสไลด์ที่ต้องการศึกษา

2.10.1.12 ที่หนีบสไลด์ ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแทนวางวัตถุ



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แสง

ที่มา: http://biology888.blogspot.com/2010_07_01_archive.html

2.10.2 วิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แสง

2.10.2.1 ตั้งล้ากล้องให้ตรง

2.10.2.2 เปิดไฟเพื่อให้แสงเข้าล้ากล้องได้เต็มที่

2.10.2.3 หมุนเลนส์ใกล้วัตถุ ให้เลนส์ที่มีกำลังขยายต่ำสุดที่ตำแหน่งแนวของล้ากล้อง

2.10.2.4 นำชิ้นงานตัวอย่างที่จะศึกษาวางบนแท่นวางวัตถุโดยปรับให้อยู่กลางบริเวณ

ที่แสงผ่าน

2.10.2.5 ค่อยๆ หมุนปุ่มปรับภาพหยาบให้กล้องเลื่อนขึ้นช้าๆ เพื่อหาระยะภาพ แต่ต้องระวังไม่ให้เลนส์ใกล้วัตถุกระทบกับสไลด์ตัวอย่าง เพราะจะทำให้เลนส์แตกได้

2.10.2.6 ปรับภาพให้ชัดเจนด้วยปุ่มปรับภาพละเอียด ถ้าวัตถุที่ศึกษาไม่อยู่ตรงกลาง ให้เลื่อนสไลด์ให้มาอยู่ตรงกลาง

2.10.2.7 ถ้าต้องการให้ภาพขยายใหญ่ขึ้นให้หมุนเลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยายสูงกว่าเดิม มาอยู่ในตำแหน่งแนวของล้ากล้อง จากนั้นปรับภาพให้ชัดเจนด้วยปุ่มปรับภาพละเอียด เท่านั้น ห้ามปรับภาพด้วยปุ่มปรับภาพหยาบเพราะจะทำให้ระยะของภาพ หรือจุดโฟกัสของภาพเปลี่ยนไป

2.10.2.8 บันทึกกำลังขยาย หาได้จากผลคูณของกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุกับกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา

2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่เราสามารถนำมาประกอบการเลือกใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสม เช่น ใช้ในการพัฒนา และเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการผลิตแม่พิมพ์โลหะ หรือในกรณีของการเลือกใช้ใบมีด (Cutting Tools) สำหรับตัดโลหะ และวัสดุชนิดต่างๆ หรืออาจเป็นการทำงานที่ได้รับการเสียดสีมากๆ เช่น เพืองเกียร์ เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีความแข็งสูงเป็นพิเศษ (ฐาปนีย์, 2554)

2.11.1 หลักการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการกดให้เป็นรอย (Indentation) การขีด หรือขีดให้เป็นรอย (Scratching) การหาค่าความแข็งของวัสดุ อาศัยหลักการ 3 อย่างคือ (ณรงค์ศักดิ์, 2549)

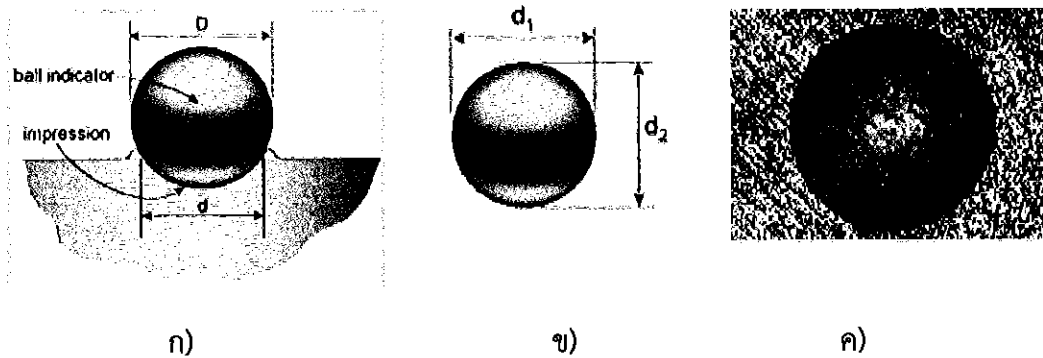
2.11.1.1 หาค่าความต้านทานต่อพลังงานการยืดหยุ่น (Elastic Hardness) โดยการให้วัสดุชนิดหนึ่งตกลงมากระทบกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง แล้วปล่อยให้กระดอนขึ้น สังเกตการณ์กระดอนของวัสดุนั้น วัสดุที่มีความแข็งมากจะกระดอนได้สูง ส่วนวัสดุที่มีความแข็งต่ำจะกระดอนได้ต่ำ

2.11.1.2 หาค่าความต้านทานต่อการตัด หรือการขีดข่วน (Resistance to Cutting or Abrasion) เป็นการนำเอาวัสดุมาขีด หรือถูกัน วัสดุใดที่มีความแข็งสูงก็จะขีด หรือถูวัสดุที่มีความแข็งต่ำให้เป็นรอยได้

2.11.1.3 หาค่าความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย (Resistance to Indentation) เป็นการนำเอาวัสดุชนิดหนึ่งมาตกลงบนผิววัสดุอีกชนิดหนึ่ง วัสดุใดที่สามารถทำให้เกิดรอยได้โตหรือลึก แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งต่ำ หากรอยกดเล็ก หรือตื้น ก็แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งสูง

2.11.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเป็นหัวบอล (Ball Indenter) ทำจากเหล็กกล้า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบคือการใช้หัวบอลกดลงบนชิ้นงานจนทำให้เกิดรอยกด (Impression) มีลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลม แสดงดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากวิธีการทดสอบนี้จะทำการแปรผลค่าความแข็งจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ดังนั้นรอยกดที่เกิดขึ้นไม่ควรแสดงลักษณะที่บิดเบี้ยวหรือลึกเกินไปจนอาจมีผลทำให้วัดค่าความแข็งผิดพลาดได้เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดนั้นมีระดับความแข็งที่แตกต่างกัน และเพื่อเป็นการป้องกันรอยกดที่ลึกจนเกินไป ค่ามาตรฐานของน้ำหนักที่ใช้กดลงบนผิวโลหะนี้ ขึ้นอยู่กับระดับความแข็งของโลหะที่นำมาทดสอบ โลหะที่มีความแข็งมาก เช่น เหล็กกล้าจะใช้น้ำหนักกด 3000 กิโลกรัม สำหรับโลหะที่มีความแข็งรองลงไป เช่น ทองเหลือง หรืออะลูมิเนียม จะใช้ค่าน้ำหนักกดลดลงมาคือ 2000 และ 1000 หรือ 500 กิโลกรัม ตามลำดับ หากในกรณีที่ชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงมาก ใช้หัวบอลที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) เพื่อลดการบิดเบี้ยวของหัวกด



รูปที่ 2.10 การวัดความแข็งแบบบริเนล

- ก) รอยกดจากหัวบอล
 ข) การวัดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด
 ค) รอยกดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบบริเนล
 ที่มา: ฐาปนีย์ (2554)

ในการวัดค่าความแข็งการกดหัวบอลลงบนผิวชิ้นงานจะเกิดการแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุ บริเวณใต้หัวกดแสดงดังรูปที่ 2.11 ทำการกดหัวบอลลงบนผิวชิ้นงานเป็นระยะเวลาประมาณ 30 วินาที หลังจากนั้นปล่อยน้ำหนักและหัวกดออก แล้วทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด จำนวน 2 ค่า โดยใช้กล้องที่มีกำลังขยายต่ำ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะถูกนำมาคำนวณค่าความแข็ง จากค่าน้ำหนักกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดขึ้นจากสมการ

$$HB = \frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi Dt} \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือน้ำหนักกด (Applied Load), กิโลกรัมแรง

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวบอล (The Diameter of the Ball), มิลลิเมตร

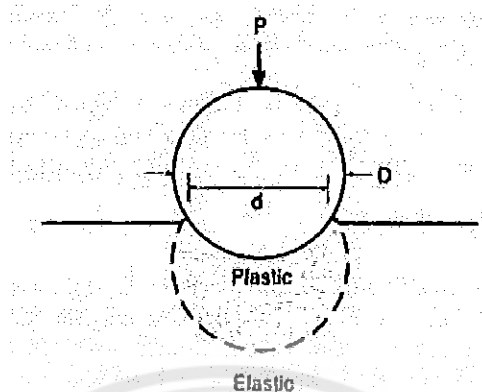
d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (The Diameter of the indentation), มิลลิเมตร

t คือความลึกของรอยกด (The Depth of the Impression), มิลลิเมตร

หมายเหตุ: ค่า HB ที่วัดได้นี้มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรงต่อตารางมิลลิเมตร (1 กิโลกรัมแรงต่อตารางมิลลิเมตร = 9.8×10^6 นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งไม่สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรงกับค่าความดันเฉลี่ย (Mean Pressure) ต่อพื้นที่ของรอยกด

โดยทั่วไปแล้ว ควรมีการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งโดยการปรับสภาพผิวของชิ้นงานให้ราบเรียบ และปราศจากเศษโลหะ หรือสิ่งสกปรกตกค้าง เพราะปัจจัยเหล่านี้ อาจทำให้ได้ค่าความแข็งที่วัดได้ไม่ถูกต้อง ส่วนข้อดีของการวัดความแข็งแบบบริเนล คือการใช้ขนาดของหัวกดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สามารถวัดความแข็งของชิ้นงานมีความแตกต่างทางโครงสร้างมากๆ หรือมีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ (Microstructural Heterogeneity) ได้ และหากพื้นผิวของชิ้นงานมีรอยขีดข่วน (Scratch) หรือผิวหยาบ (Roughness) เพียงเล็กน้อยก็จะไม่เป็นผลทำให้ค่าความแข็งที่

ได้ผิดพลาด แต่การวัดความแข็งแบบบริเนลนี้อาจมีความผิดพลาดจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เกิดขึ้นได้จากตัวผู้วัดเอง และยังมีข้อจำกัดในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.11 แสดงการแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล
ที่มา: ฐาปนีย์ (2554)

เมื่อพิจารณาเนื้อโลหะ หรือวัสดุบริเวณใต้หัวกดจะพบว่าการแปรรูปถาวร (Plastic Deformation) และบริเวณดังกล่าวนี้ จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณของเนื้อโลหะที่มีการแปรรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ซึ่งจะทำหน้าที่ขัดขวางการไหล หรือเคลื่อนตัวแบบพลาสติก (Plastic Flow) ของเนื้อโลหะด้านบน ในสภาวะนี้เป็นการแปรรูปของโลหะที่ถูกจำกัด (Plane Strain Compressive) ซึ่งหากเนื้อโลหะด้านล่างไม่มีความยืดหยุ่น หรือแข็งมาก (Rigid) อาจทำให้เนื้อโลหะที่แปรรูปถาวรเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนล้อมรอบหัวกดแสดงดังรูปที่ 2.10 ก) แต่จะไม่ค่อยพบสภาวะเช่นนี้ เนื่องจากเนื้อโลหะที่ถูกแทนที่ด้วยหัวกดนั้นถูกพิจารณาว่าเกิดมาจากปริมาตรที่ลดลงของเนื้อวัสดุที่เสียรูปแบบอิลาสติกโดยรอบ

2.11.3 ข้อควรคำนึงถึงในการทดสอบค่าความแข็ง

2.11.3.1 หัวกด และแท่นรองชิ้นงานต้องสะอาด และจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสม

2.11.3.2 พื้นผิวที่จะทำการทดสอบควรสะอาดปราศจากออกไซด์ (Oxide) ต้องผ่านการขัดหยาบ มีความเรียบเสมอ และต้องตั้งฉากกับหัวกด

2.11.3.3 การทดสอบบนพื้นผิวที่มีความโค้งอาจเกิดความผิดพลาดได้

2.11.3.4 ชิ้นงานที่ทดสอบควรมีความหนาสม่ำเสมอ และควรมีความหนามากกว่าความลึกของรอยกดประมาณ 10 เท่า

2.11.3.5 ระยะห่างระหว่างรอยกดควรมีค่าประมาณ 3-5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด

2.11.3.6 ความเร็วในการกดควรควบคุมให้มีค่ามาตรฐาน

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.M. Hassan, O.M. Bataineh และ K.M. Abed (2008) ทำการศึกษาสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง อัตราส่วนทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการหล่อแบบบางเท นำชิ้นงานหลังการหล่อไปอบละลาย จากนั้นนำไปชุบน้ำ แล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120, 145, 170, 195 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15, 25, 40 และ 45 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ของเวลา และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาบ่มแข็งเพิ่มขึ้น จนถึงเวลาการบ่มแข็งที่ 45 ชั่วโมง ความแข็งจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าที่เวลา 45 ชั่วโมง เกิดการบ่มนานเกิดพอดิ ส่วนอุณหภูมิบ่มแข็งพบว่าค่าความแข็งจะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้น จนถึงอุณหภูมิบ่มแข็งเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นค่าความแข็งจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้การขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันลดลง

T. Nakajima, M. Takeda และ T. Endo (2003) การตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนักทองแดง ผ่านการทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำการบ่มแข็งที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ของเวลา เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของดิสโลเคชัน เมื่อดิสโลเคชันมีความหนาแน่นมากขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย

Z. Feng, Y. Yang, B. Huang, X. Luo และ J. Ru (2010) การตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง-แมกนีเซียม โดยทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส ที่ช่วงเวลาหลากหลายตั้งแต่ 10 นาที-9 ชั่วโมง และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าที่เวลา 10 นาที อุณหภูมิการบ่มแข็ง 195 องศาเซลเซียส การตกตะกอนเกิดขึ้นไม่ชัดเจน ไม่เต็มประสิทธิภาพ โครงสร้างจุลภาคของตะกอนมีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลม ดิสโลเคชันแยกออกจากกันทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเกิดขึ้นได้ง่าย ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สิตลา รัตนซ้อน และสิริพร โรจนนันต์ (2552) งานวิจัยศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเงินสเตอร์ลิงผสมอะลูมิเนียม หลังผ่านการบ่มแข็ง เริ่มจากหลอมเงิน ทองแดง และอะลูมิเนียม แล้วหล่อเป็นอินกอต (Ingot) แล้วนำไปผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวในน้ำ ตามด้วยการบ่มแข็งโดยใช้อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวในอากาศ ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และวัดความแข็งของชิ้นงานหล่อ ชิ้นงานอบละลาย และชิ้นงานหลังการบ่มแข็ง ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างของงานหล่อมมีลักษณะเป็นเดนไดรท์ประกอบด้วยเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก และโครงสร้างยูเทกติกอยู่ในช่องระหว่างเดนไดรท์ ความแข็งของงานหล่อมมีค่าเฉลี่ย 88 ± 3 HV โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานหลังการบ่มแข็งขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแข็ง สรุปได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะส่งผลให้ค่าความแข็งสูงสุดมีค่า 211 ± 3 HV

สุทธาวัลย์ อิมอุไร, ธรณินทร์ ไชยเรืองศรี, ชัญญา ธนชยานนท์, จุลเทพ ขจรไชยกุล และ J.T.H. Pearce (2550) เริ่มจากนำชิ้นงานทดลองโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356 มาทำเป็น

สารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวในน้ำร้อนประมาณ 80 องศาเซลเซียส และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 – 500 ชั่วโมง จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356 ในสภาพหล่อพบเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ขนาดใหญ่พบโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นแผ่นยาวของซิลิกอนแทรกอยู่ระหว่างเดนไดรต์ปฐมภูมิ และพบเฟสระหว่างโลหะของอะลูมิเนียม, ซิลิกอน และเหล็ก กระจายทั่วชิ้นงาน เมื่อปรับสภาพชิ้นงานด้วยความร้อนให้เป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง โครงสร้างยูเทคติกมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น เนื่องจากซิลิกอนบางส่วนจากโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดการละลายกลับไปเนื้อพื้นมากเกินพอจนเกิดเป็นสถานะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดในขณะเดียวกันองค์ประกอบภายในเนื้อพื้นจะเกิดการแพร่กระจายกันอย่างสม่ำเสมอ และค่าความแข็งเริ่มลดลงเมื่อใช้เวลาบ่มนานกว่า 100 ชั่วโมง



15945495

นส.

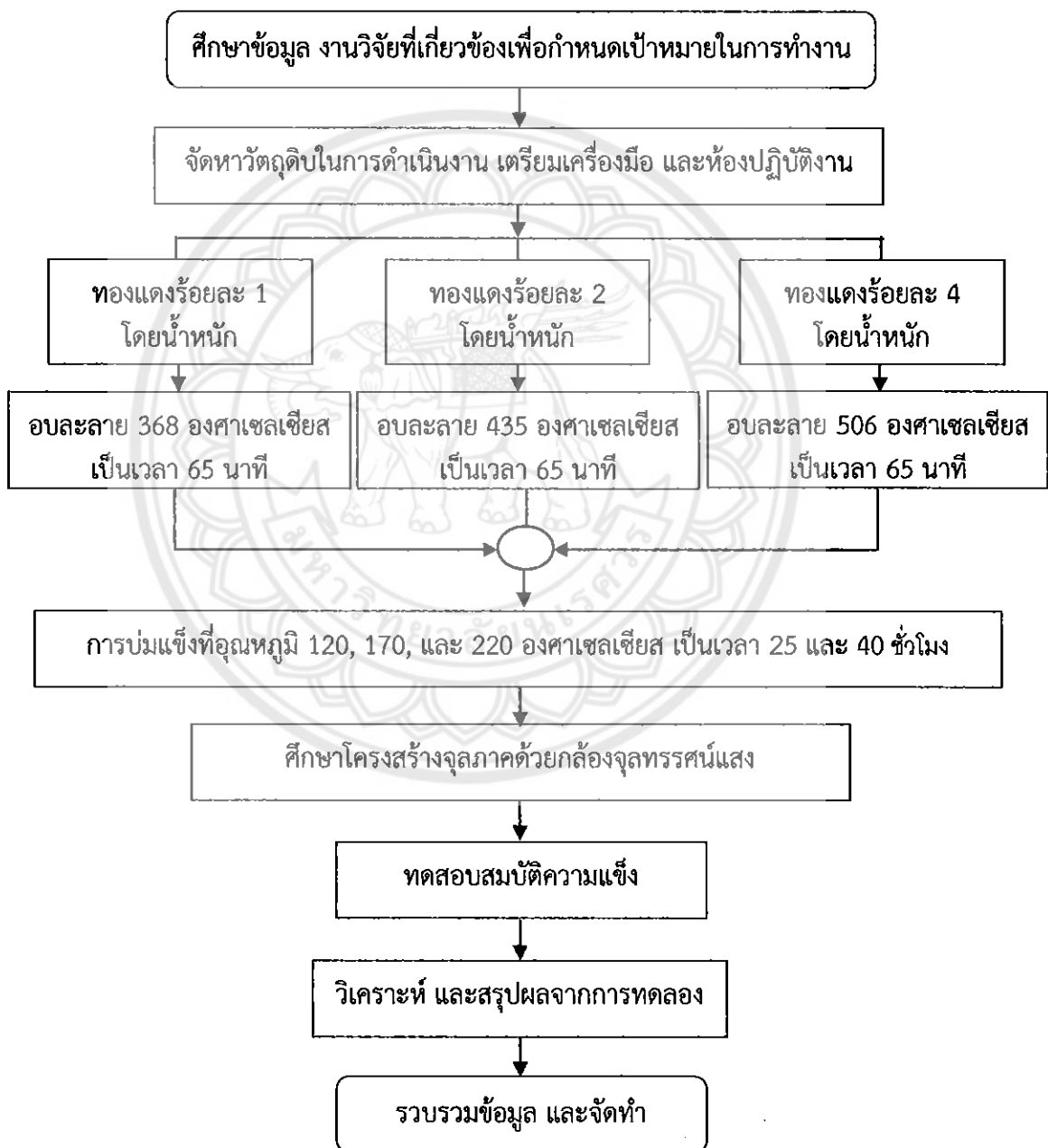
จ 5270

2564

บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินโครงการในการศึกษาผลของกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในโครงการ

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ขึ้นรูปโดยการหล่อแบบด้วยแม่พิมพ์ถาวร มีอัตราส่วนผสมของทองแดงเท่ากับร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน และสารเคมี

- ก. เครื่องกลึง
- ข. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ค. เต้าอบอุณหภูมิสูง
- ง. กระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
- จ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียด 1 ไมครอน
- ฉ. กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดย

ปริมาตร

3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์แสง
- ข. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล

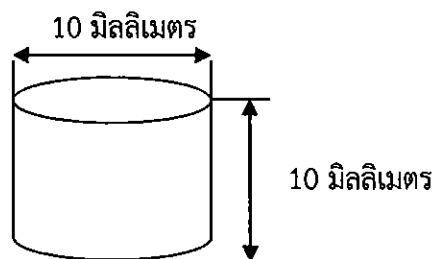
3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.3.1 ศึกษาข้อมูล และรวบรวมข้อมูล

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติความแข็ง

3.3.2 การเตรียมชิ้นงาน

นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่ผ่านการหล่อกิ่งและตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และความสูง 10 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2



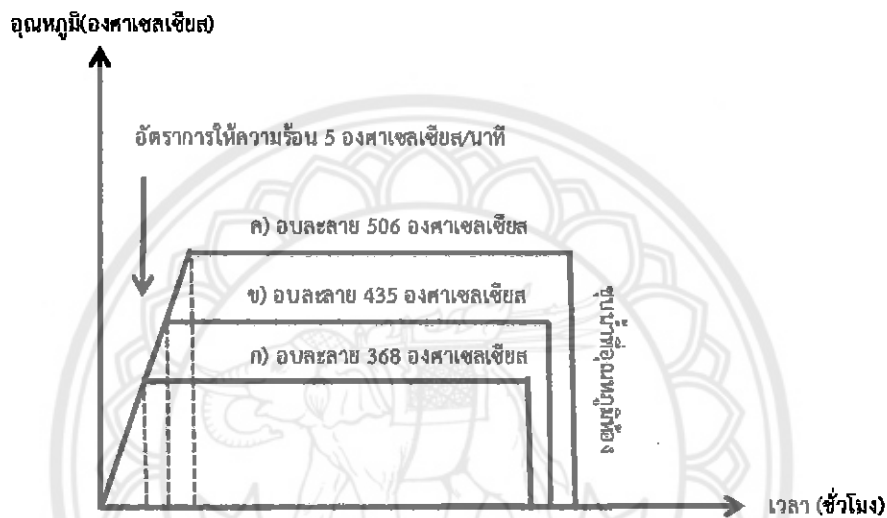
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการกลึง และตัดแล้ว

3.3.3 กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

นำชิ้นงานหล่อที่ผ่านการกลึงแล้ว เข้าสู่กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ดังขั้นตอนต่อไปนี้

3.3.3.1 การอบละลาย

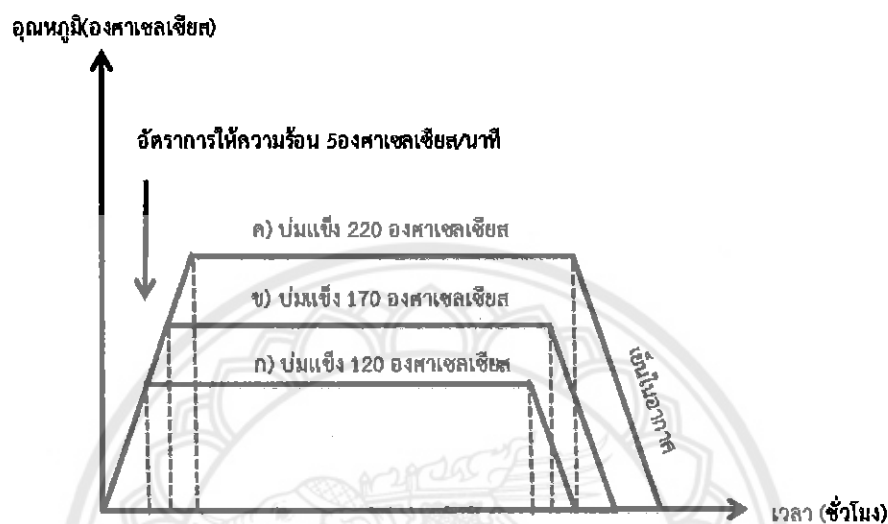
นำชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก มาอบละลายที่อุณหภูมิ 368, 435 และ 506 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 65 นาที แล้วนำออกจากเตา และทำการชุบน้ำที่อุณหภูมิห้องทันที ขั้นตอนนี้แสดงดังรูปที่ 3.3



- รูปที่ 3.3** โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ทำการการอบละลายเป็นเวลา 65 นาที
- ก) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส
 - ข) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส
 - ค) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก อบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส

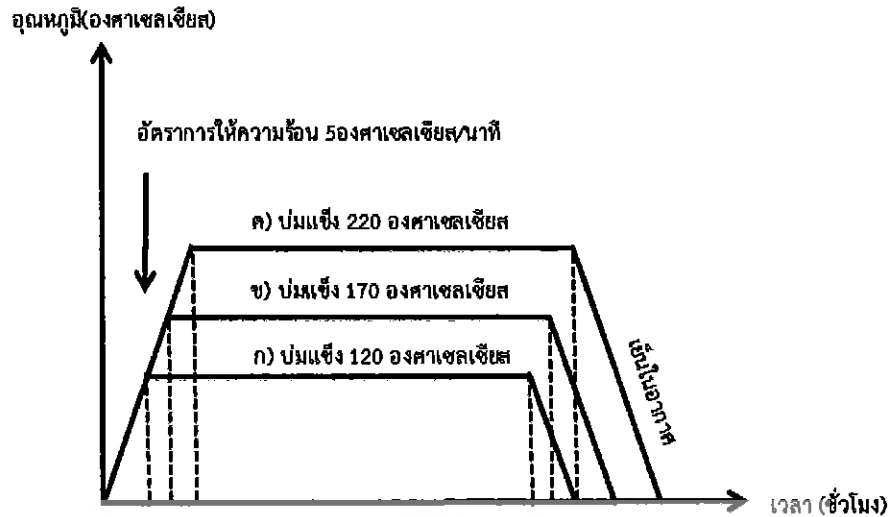
3.3.3.2 การบ่มแข็ง

นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบละลาย มาบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120, 170, และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 และ 40 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.4 ก)-ค) และรูปที่ 3.5 ก)-ค)



รูปที่ 3.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มแข็ง เป็นเวลา 25 ชั่วโมง

- ก) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
- ข) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส
- ค) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มแข็ง เป็นเวลา 40 ชั่วโมง

- ก) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
- ข) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส
- ค) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส

3.3.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนักก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง อุณหภูมิ และเวลาในการบ่มแข็งที่ต่างกัน

3.3.4.1 ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ก. นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนักก่อน และหลังที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กมาขัดด้วยกระดาษทราย จากเบอร์หยาบไปหาเบอร์ละเอียด ดังนี้ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

ข. นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการขัดในขั้นต้นมาขัดมันด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 1 ไมครอน

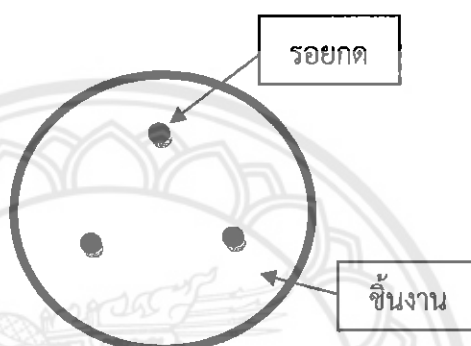
ค. นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการขัดมันมากัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร โดยการชุบชิ้นงานลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ดด้วยสำลี และเป่าให้แห้ง

ง. นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ที่กัดกรดเรียบร้อยแล้ว ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง

จุลทรรศน์แสง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง อลูมิเนียม และเวลาในการบ่มแข็งที่ต่างกัน

3.3.5 ทดสอบสมบัติความแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยนำหน้าหนักก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลด้วยการกดลงบนชิ้นงาน 3 จุด แสดงดังรูปที่ 3.5 แล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.5 ภาพวาดตำแหน่งที่ใช้ทดสอบความแข็ง

3.3.5.1 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบบริเนล

ก. นำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยนำหน้าหนักก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก มาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 เพื่อปรับชิ้นงานให้ได้ระนาบ

ข. ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1/16$ นิ้ว นำหนักทดสอบ 187 กิโลกรัมแรง ระยะเวลาในการกด 15 วินาที

3.3.6 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค, อัตราส่วนผสม, สมบัติความแข็ง, อลูมิเนียม และเวลาในการบ่มแข็ง และของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยนำหน้าหนักก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก แล้วทำการสรุปผลการทดลอง

3.3.7 จัดทำรายงาน

จัดทำเอกสารรวบรวมผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

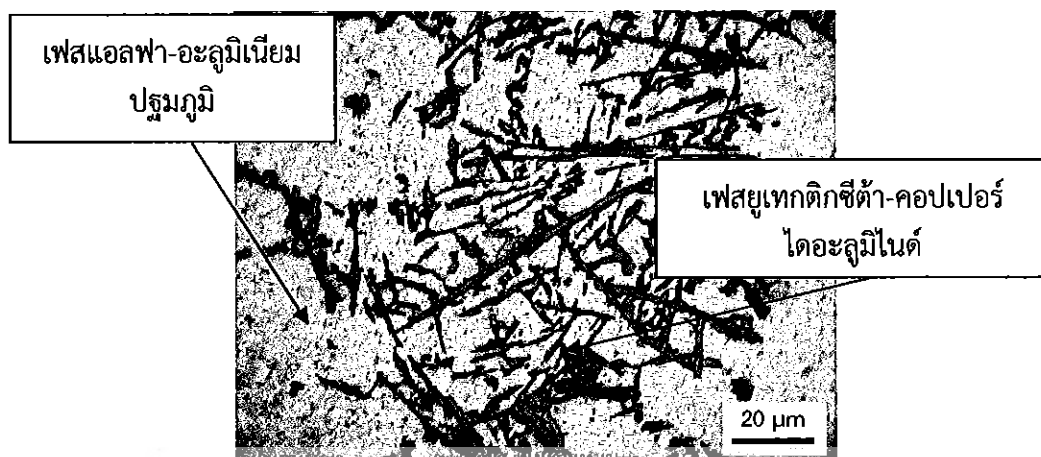
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์การทดลองผลของอุณหภูมิ และเวลาบ่ม แข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ในสภาพหล่อ และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของ อนุภาคขนาดเล็กต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตรา ส่วนผสม อุณหภูมิ และเวลาในการบ่มแข็งต่างกันดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ

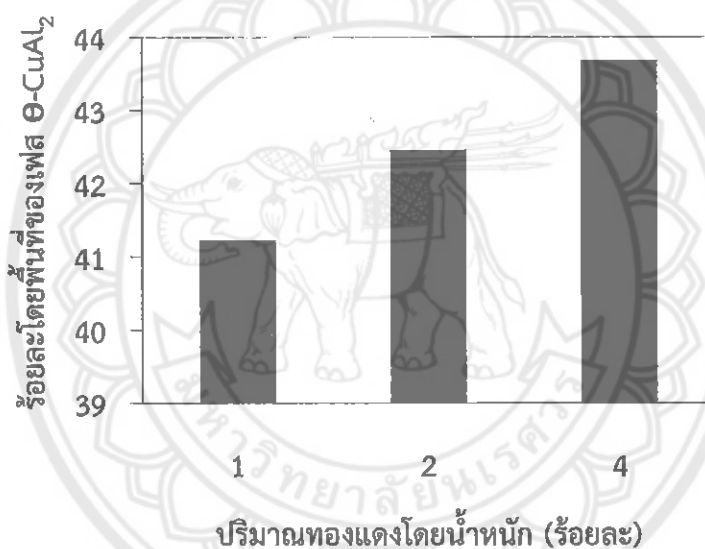
4.1.1 ผลของทองแดงต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพ หล่อ

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อด้วย แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (α -Al Primary) เป็นสีขาว และเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ (θ - CuAl_2) ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวปลาย แหลมวางตัวอยู่ระหว่างขอบเกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.1 เฟสยูเทคติก ซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมทองแดงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ พื้นที่เฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสม ของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก มีปริมาณร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์เท่ากับร้อยละ 41.23, 42.46 และ 43.69 ของชิ้นงานในสภาพหล่อตามลำดับ แสดง ดังรูปที่ 4.2

เนื่องจากขณะที่ทำการหล่อเมื่ออะลูมิเนียมเย็นตัวลงมาถึงเส้นลิกวิดัส (Liquidus line) เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมจะเกิดการแข็งตัวก่อน และเมื่ออุณหภูมิลดลงปริมาณของเฟสแอลฟา- อะลูมิเนียมปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อเริ่มเกิดการแข็งตัวของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม ภูมิ ทองแดงที่เคยละลายอยู่อย่างสมบูรณ์ในอะลูมิเนียมในสถานะของเหลวเริ่มถูกขับออกมาเรื่อยๆ ทองแดงที่ละลายอยู่มากเกินความสามารถในการละลายของทองแดงในอะลูมิเนียมในสถานะของแข็ง จะถูกขับออกมาอยู่ในเฟสของเหลว และเมื่ออุณหภูมิลดลงจะถูกขับออกมาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติกเล็กน้อย แสดงดังรูป 2.2 เฟสของเหลวทั้งหมดเกิดแข็งตัวทั้งหมด กลายเป็นเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์-อะลูมิเนียม (θ - CuAl_2 -Al) อยู่ตรงบริเวณขอบ เกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม ดังนั้นยิ่งปริมาณทองแดงมากขึ้นก็จะมีเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ ไดอะลูไมด์เพิ่มขึ้นด้วย (Porter and Easterling, 1992)



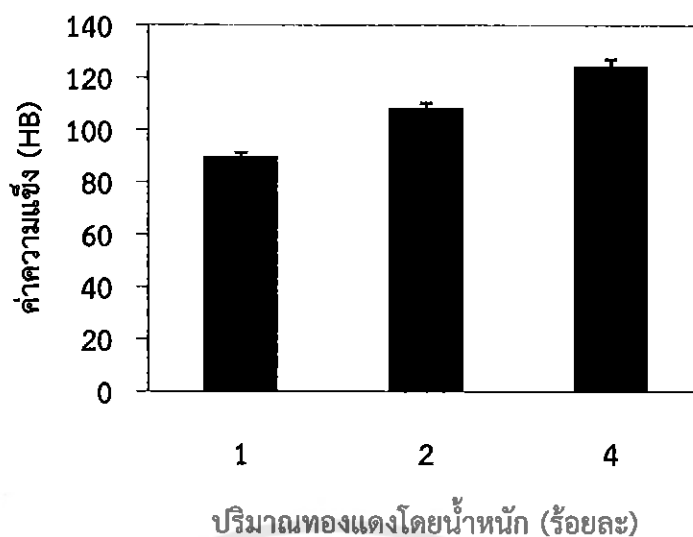
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ



รูปที่ 4.2 ร้อยละโดยพื้นที่ที่เฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ

4.1.2 ผลของทองแดงต่อความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล โดยนำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาวัดความแข็งแบบสุ่มเป็นจำนวน 3 จุด โดยแต่ละจุดมีระยะห่าง 4 เท่าของรอยกด พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89.76 HB, 108.29 HB และ 124.41 HB ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.3 ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์เป็นเฟสที่มีความแข็งมากกว่าเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เมื่อมีปริมาณ และการกระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานเพิ่มขึ้น



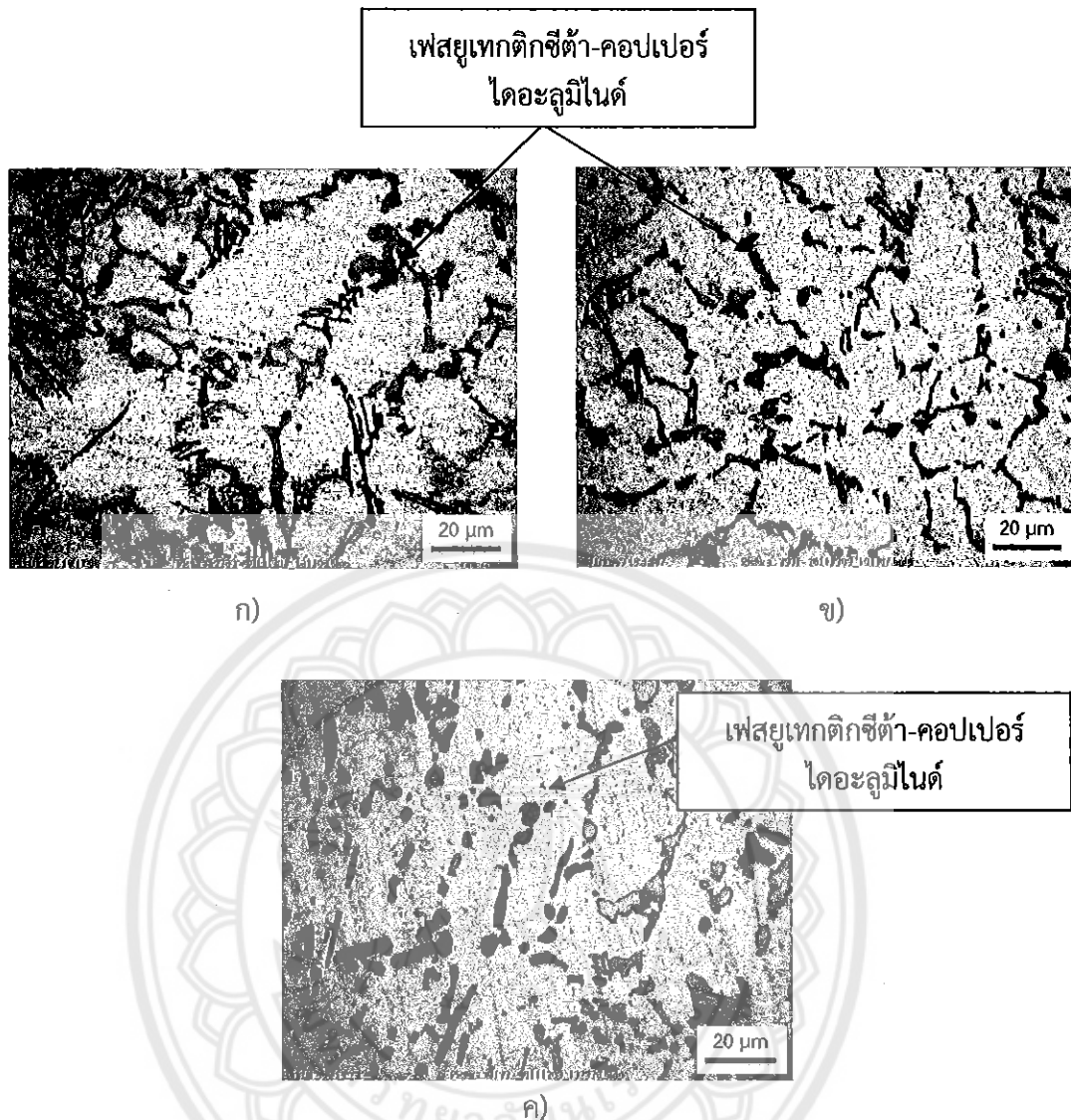
รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ

4.2 ผลการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคนาขนาดเล็ก

เมื่อนำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก มาผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 368, 435 และ 506 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 65 นาทีตามลำดับ และชุบน้ำที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 และ 40 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

4.2.1 ผลของทองแดงต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคนาขนาดเล็ก

ในขั้นตอนการอบละลายเป็นสารละลายของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2, และ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368, 435 และ 506 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และทำการบ่มแข็งที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง พบว่าเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียม-ไนต์จะมีลักษณะกลมมนมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.4 ก)-ค) โดยเฉพาะตรงบริเวณปลายแหลม เมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อแสดงดังรูป 4.1 เนื่องจากเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์สามารถละลายกลับไปเนื้อพื้นเป็นสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด

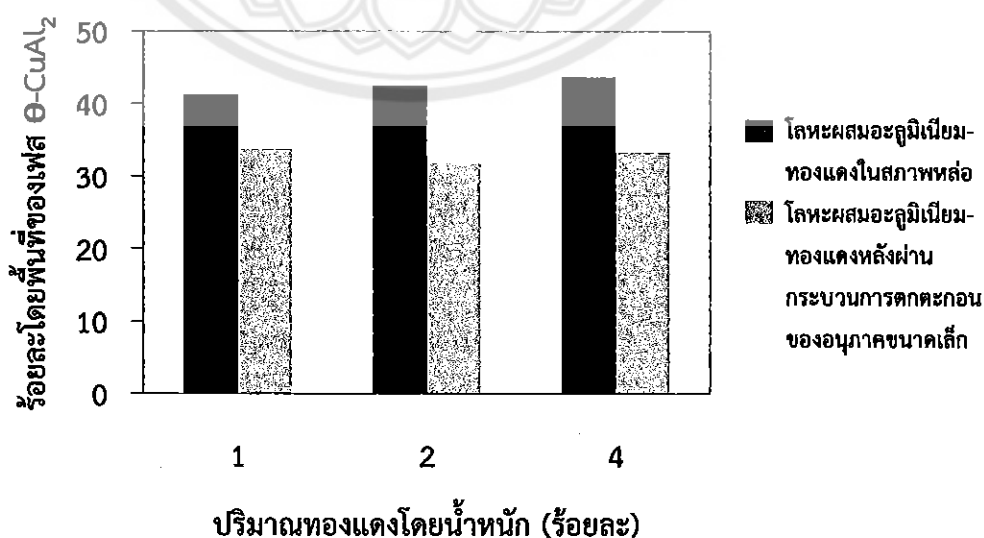


- รูปที่ 4.4** โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก
- ก) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อบละลายที่ 368 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 65 นาที บ่มแข็งที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง
- ข) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อบละลายที่ 435 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 65 นาที บ่มแข็งที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง
- ค) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก อบละลายที่ 506 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 65 นาที บ่มแข็งที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนักหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

ร้อยละทองแดง โดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส ยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ ไดอะลูมิเนียมในสภาพ หล่อ	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส ยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ ไดอะลูมิเนียมในภายหลัง อบละลาย	ร้อยละที่ลดลงของ พื้นที่เฟสยูเทกติกซีต้า- คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียม
1	41.23	33.75	7.48
2	42.46	31.86	9.52
4	43.69	33.28	10.42

จากการวัดปริมาณร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมที่ละลายกลับเข้าสู่เนื้อพื้นอะลูมิเนียมจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.4 ก-ค) เนื่องจากความสามารถในการละลายของทองแดงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นโดยสังเกตได้จากเส้นโซลิวสในแผนภูมิสมดุล แสดงดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นทองแดงจะละลายกลับไปในเนื้อพื้นเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมปฐมภูมิได้มากเช่นกันเมื่อทำการอบละลาย เป็นผลให้เฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมมีปริมาณน้อยลงภายหลังจากการอบละลายซึ่งสอดคล้องกับผลการหาพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมในทุกอัตราส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมลดลงร้อยละ 7.48, 9.52 และ 10.42 สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

4.2.2 ผลของทองแดงต่อความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

ผลของทองแดงต่อความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก พบว่าที่อัตราส่วนผสมของทองแดงมากขึ้น ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของทองแดงในโครงผลึกจะเพิ่มขึ้น เมื่อดูจากเส้นโซลิวสในแผนภูมิสมดุล แสดงดังรูปที่ 2.2 และเมื่อทำการบ่มแข็งทำให้เกิดตะกอนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างจุลภาคมากขึ้นตามสัดส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงเพิ่มขึ้น

4.2.3 ผลของอุณหภูมิบ่มแข็งต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของโลหะผสม

อะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

จากทฤษฎีกล่าวว่าอุณหภูมิบ่มแข็งจะเป็นตัวส่งเสริมให้การตกตะกอนเกิดเร็วขึ้น ช่วงเริ่มเกิดการตกตะกอน อุณหภูมิบ่มแข็งที่ต่ำจะเกิดโซน GP1 และ GP2 แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยโซน GP1 จะเกิดเนื่องจากการแพร่เข้ามารวมกันของอะตอมของทองแดงในสารละลายของแข็งอิมิตวียังยวดอะตอมของทองแดงมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของอะลูมิเนียม ดังนั้นอะตอมของทองแดงจะเข้าแทนที่อะตอมของอะลูมิเนียม โครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์ และโซน GP2 โครงผลึกตะกอนยึดติดกับโครงผลึกเนื้อพื้น เป็นแบบโคฮีเรนต์เช่นเดียวกัน แต่ขนาดของตะกอนจะมีขนาดใหญ่กว่าโซน GP1 เมื่อบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเฟส θ' และเฟส θ ที่มีโครงผลึกตะกอนเป็นแบบอินโคฮีเรนต์ ตะกอนแยกออกจากโครงผลึกเนื้อพื้น ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง (แม้, 2544) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ที่ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 170 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด แสดงดังตารางที่ 4.2

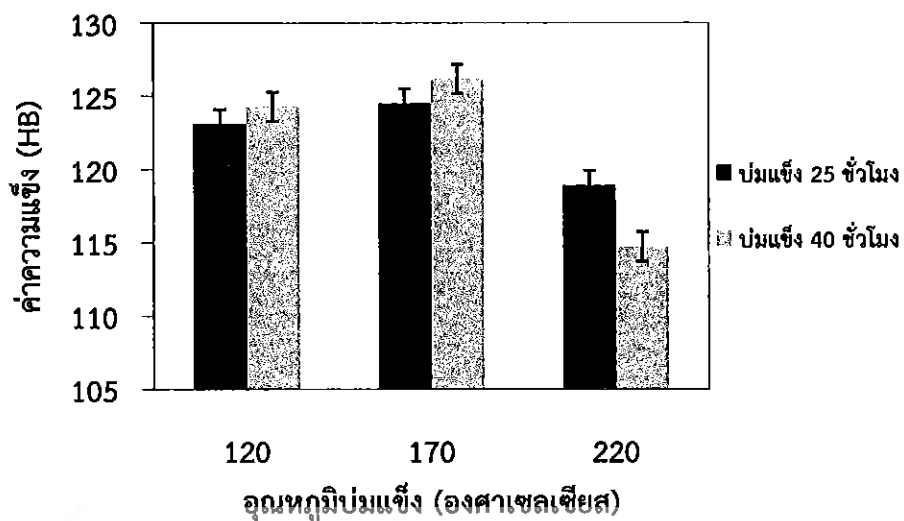
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนักหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง

ทองแดงโดยน้ำหนัก (ร้อยละ)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (HB)
1	25	120	123.09
		170	124.50
		220	118.91
	40	120	124.28
		170	126.17
		220	114.73

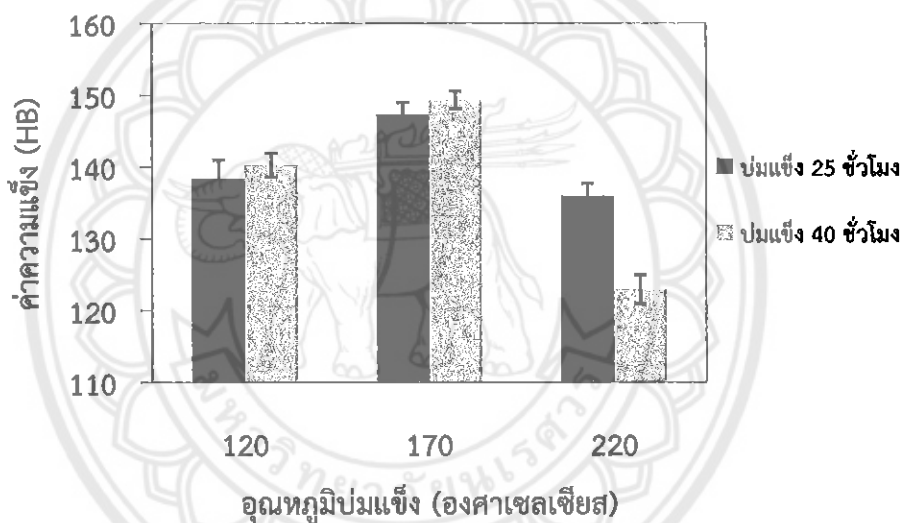
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนักหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง

ทองแดงโดยน้ำหนัก (ร้อยละ)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)
2	25	120	138.42
		170	147.31
		220	135.94
	40	120	140.31
		170	149.35
		220	122.97
4	25	120	164.67
		170	173.11
		220	155.98
	40	120	173.11
		170	175.64
		220	148.94

โดยที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 120 และ 170 องศาเซลเซียส จะเกิดเป็นโซน GP1 และ GP2 เริ่มเกิดการตกตะกอน ตะกอนจะค่อยๆ ใหญ่ขึ้น ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 170 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งจะมากที่สุด เพราะอะตอมของทองแดงสามารถแพร่เข้ามารวมกันได้เร็วขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 120 องศาเซลเซียส ไปเป็น 170 องศาเซลเซียส ซึ่งโครงสร้างตกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนซ์ยึดติดกับโครงผลึกเนื้อพื้น ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน แต่ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 220 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าค่าความแข็งเริ่มลดลง เนื่องจากตะกอนเริ่มเข้าสู่ลักษณะแบบอินโคฮีเรนซ์ ตะกอนขนาดใหญ่เกินไปทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้น้อยลงส่งผลให้ความแข็งลดลง ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนักหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 4.6 ก)-ค)



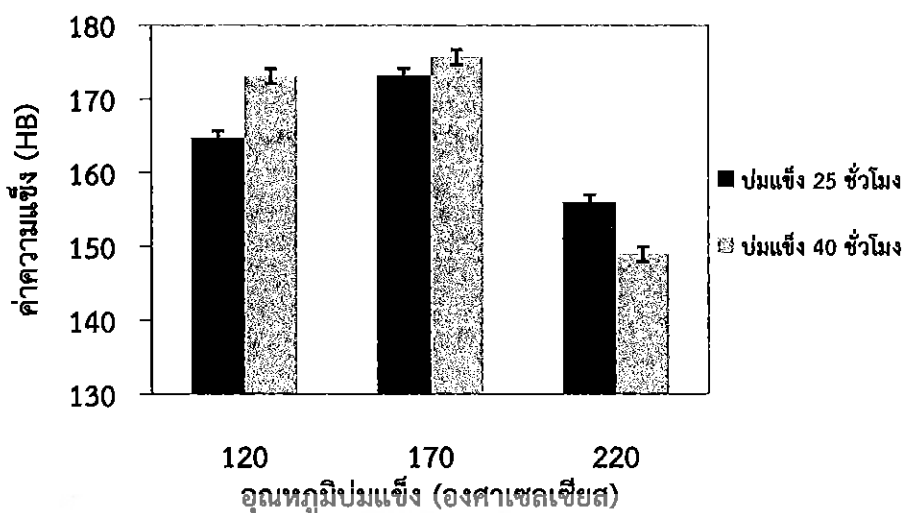
ก)



ข)

รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคนาโนเล็ก

- ก) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
 ข) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



ค)

รูปที่ 4.6 (ต่อ) ค่าความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

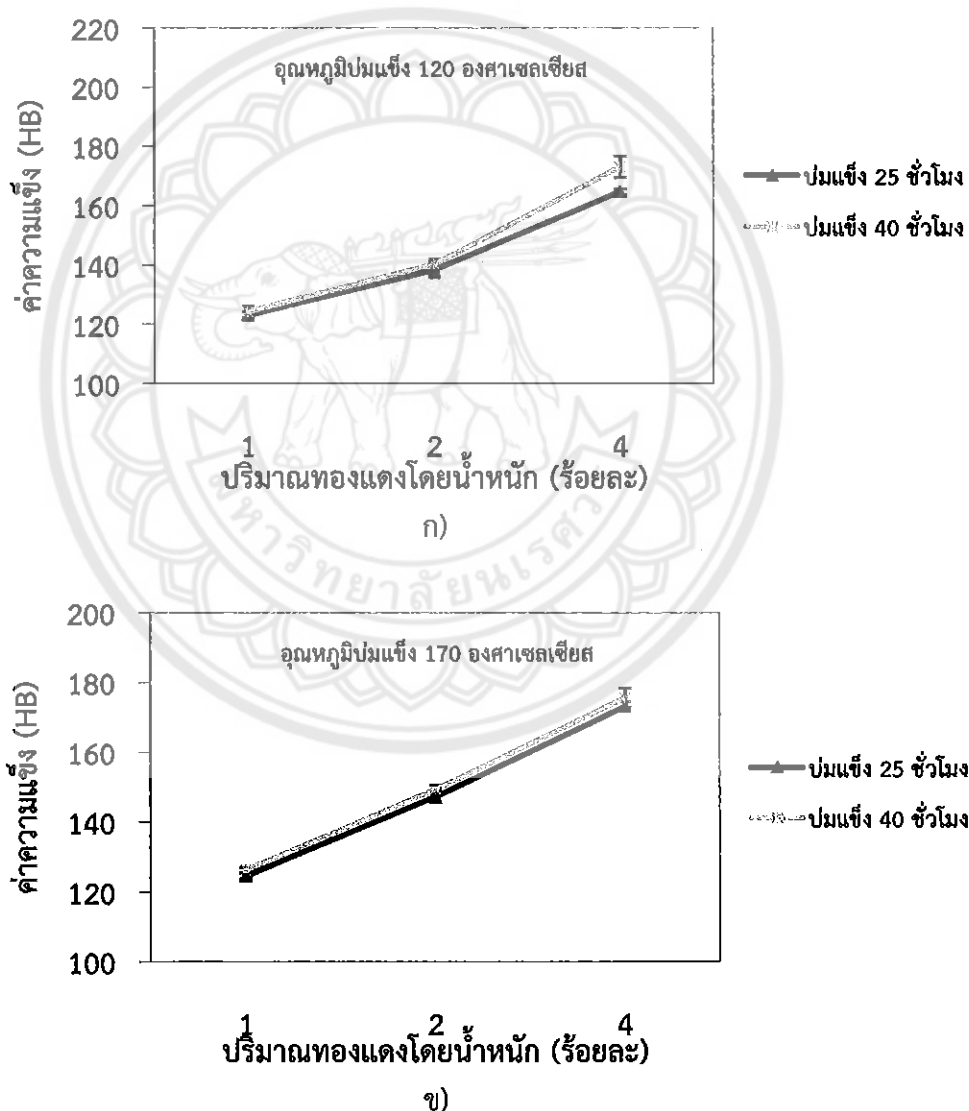
ค) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

4.2.4 ผลของเวลาปั๊มแรงต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

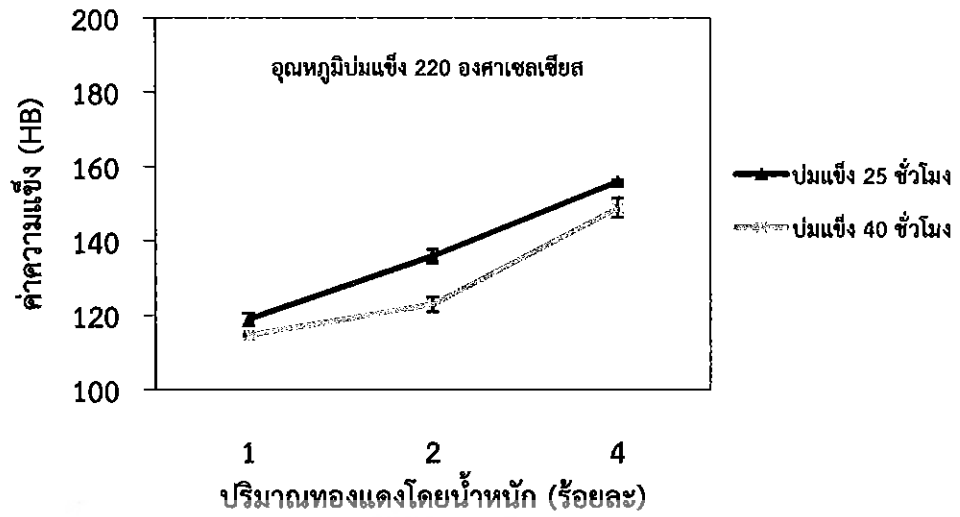
จากทฤษฎีกล่าวว่าเมื่อเวลาการปั๊มแรงเพิ่มขึ้นการตกตะกอนจะเริ่มเกิดขึ้น และขนาดของตะกอนก็จะค่อยๆ ใหญ่ขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่เวลาในการปั๊มแรงนานเพียงพอ จะเกิดเป็นช่วงเหมาะสมของการตกตะกอน และถ้าการปั๊มแรงยังคงดำเนินต่อไป ตะกอนจะมีขนาดหยาบขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นจะเริ่มมีความแข็งแรงลดลง แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยขั้นแรกจะเกิดเป็นโซน GP1 เกิดการจับตัวกันของอะตอมของทองแดงในสารละลายของแข็งอ้อมตัวยิ่งยวด โครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์กับโครงผลึกเนื้อพื้น เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดเป็นโซน GP2 โครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์กับโครงผลึกเนื้อพื้นเช่นกัน หลังจากปั๊มแรงเกินจุดสูงสุดแล้วจะเกิดเฟส θ' ตะกอนจะแยกตัวออกจากโครงผลึกเนื้อพื้น โดยโครงผลึกตะกอนเป็นแบบอินโคฮีเรนต์กับโครงผลึกเนื้อพื้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดเป็นเฟส θ ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง (แม้น, 2544) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ทำการปั๊มแรงที่เวลาปั๊มแรง 25 และ 40 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิปंपแรง 170 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิปंपแรงที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด พบว่าเวลาปั๊มแรง 25 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงต่ำกว่าที่เวลาปั๊มแรง 40 ชั่วโมง เล็กน้อย เนื่องจากเวลาปั๊มแรง 25 ชั่วโมง จะเกิดโซน GP1 โครงผลึกตะกอนจะค่อยๆ ใหญ่ขึ้นเป็นแบบโคฮีเรนต์ ในขณะที่เวลาปั๊มแรง 40 ชั่วโมง จะเกิดโซน GP2 โครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์เช่นกัน แต่โครงผลึกตะกอนจะมีขนาดใหญ่มากกว่าโซน GP1 ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้มากกว่าที่เวลาปั๊มแรง 25 ชั่วโมง ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า แสดงดังรูปที่ 4.6 ก)-ค) แต่ค่าความแข็งแรงที่ได้นั้นสูงกว่าเพียงเล็กน้อย ในเชิงพาณิชย์แล้วไม่แนะนำให้ปั๊มแรงที่เวลา 40 ชั่วโมง เนื่องจากจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และต้นทุน จึงควรเลือกใช้เวลาปั๊มแรง 25 ชั่วโมง

4.2.5 ผลของทองแดงต่อความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กที่เวลา และอุณหภูมิบ่มแข็งเดียวกัน

ผลของทองแดงต่อความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิและเวลาบ่มแข็งเดียวกัน ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลาบ่มแข็ง 25 และ 40 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.7 ก)-ค) โดยที่อุณหภูมิ และเวลาบ่มแข็งเดียวกัน จะเห็นว่าอัตราส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งที่สูงเนื่องจากเกิดเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมในดมากกว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก จึงทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงเพิ่มขึ้นดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2



รูปที่ 4.7 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก
 ก) อณูหภูมิบ่มแข็ง 120 องศาเซลเซียส เวลาบ่มแข็ง 25 และ 40 ชั่วโมง
 ข) อณูหภูมิบ่มแข็ง 170 องศาเซลเซียส เวลาบ่มแข็ง 25 และ 40 ชั่วโมง



ค)

รูปที่ 4.7(ต่อ) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก
 ค) จุดหมึบมแข็ง 220 องศาเซลเซียส เวลาบ่มแข็ง 25 และ 40 ชั่วโมง



บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของโครงการ

5.1.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวร โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิเป็นสีขาว และเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว ปลายแหลมวางตัวอยู่ระหว่างขอบเกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยอัตราส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มส่งผลให้เฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์ และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

5.1.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ในขั้นตอนการอบละลายเป็นสารละลายของแข็ง เฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์จะมีลักษณะกลมมนมากขึ้น โดยเฉพาะตรงบริเวณปลายแหลม เมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงในสภาพหล่อ จากการวัดปริมาณร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์ที่ละลายกลับเข้าสู่เนื้อพื้นอะลูมิเนียมจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้น และค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

5.1.3 ผลของอุณหภูมิบ่มแข็งต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 120 องศาเซลเซียส จะเริ่มเกิดการตกตะกอน และที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 170 องศาเซลเซียส ตะกอนจะค่อยๆ ใหญ่ขึ้น โครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์กับเนื้อพื้น ค่าความแข็งจะมากที่สุด แต่เมื่ออุณหภูมิบ่มแข็ง 220 องศาเซลเซียส ตะกอนจะใหญ่มากเกินไปเข้าสู่ช่วงสมดุล โครงผลึกตะกอนเป็นแบบอินโคฮีเรนต์ ส่งผลให้ค่าความแข็งจึงลดลง

5.1.4 ผลของเวลาบ่มแข็งต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก ในทุกอัตราส่วนผสมของทองแดงที่อุณหภูมิบ่มแข็งเท่ากัน พบว่าเวลาบ่มแข็งที่ 25 และ 40 ชั่วโมง โครงผลึกตะกอนเป็นแบบโคฮีเรนต์เช่นเดียวกัน แต่ที่เวลาบ่มแข็ง 40 ชั่วโมง ตะกอนจะมีขนาดใหญ่กว่าที่เวลาบ่มแข็ง 25 ชั่วโมง ทำให้ค่าความแข็งจึงสูงกว่าเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ปริมาณทองแดงโดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงสามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของทองแดงได้ แต่ควรอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 0.5-5.65 โดยน้ำหนัก

5.2.2 การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง สามารถเลือกชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบอื่นๆ มาศึกษา และเปรียบเทียบผลได้

5.2.3 ขั้นตอนการบ่มแข็งสามารถศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอุณหภูมิ และเวลาที่ทำให้ค่าความแข็งมีค่าสูงที่สุด

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 การเปิด และปิดเตาอบต้องวางแผนการใช้เตาอย่างรอบครอบ เนื่องจากข้อจำกัดของการเปิด และปิดอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรมซึ่งไม่เอื้ออำนวยในการปฏิบัติงานที่ต้องใช้เวลาเป็นตัวแปรในการศึกษา

5.3.2 การใช้เตาอบที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตา อาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานเกิดอันตรายได้ ฉะนั้นเราจึงควรใส่อุปกรณ์ที่ป้องกันความร้อนทุกครั้ง

5.3.3 การวัดความแข็งบางครั้งได้ค่าผิดพลาด เนื่องจากการวาง และการขีดชิ้นงานไม่ได้ระนาบ จึงควรระมัดระวังในการวาง และการขีดชิ้นงานให้ได้ระนาบก่อนการวัดความแข็งทุกครั้ง

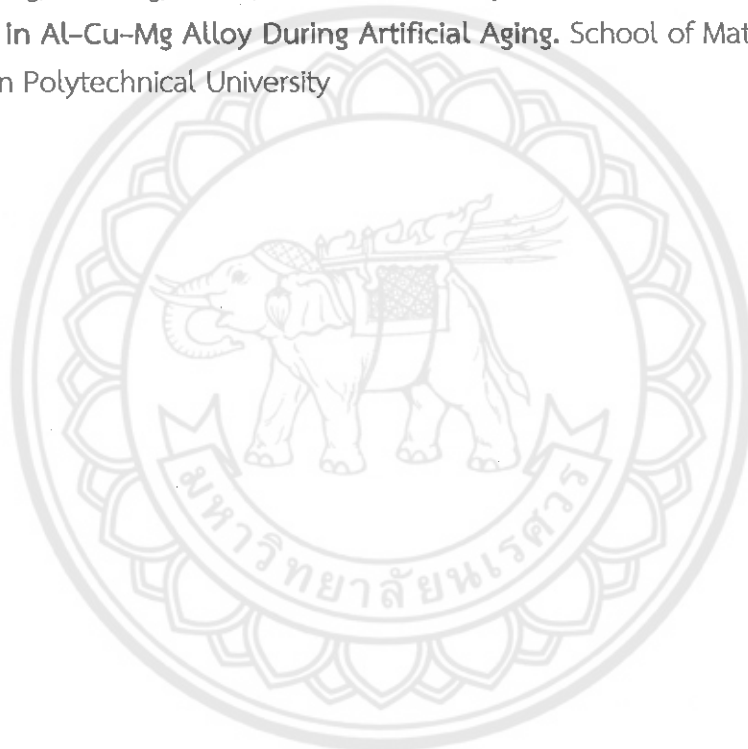


เอกสารอ้างอิง

- เขาวลิต เชียงกุล. (2542). โลหะวิทยา. (พิมพ์ครั้งที่2). บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด
ฐานีย์ อุดมผล. (2554). การทดสอบความแข็ง. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2554 จาก,
[http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/1_2552/ Mech%20met%20lab%20PDF/Mech%20met%20handout-Th/Lab_2Hardness_th.pdf](http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/1_2552/Mech%20met%20lab%20PDF/Mech%20met%20handout-Th/Lab_2Hardness_th.pdf)
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ.
- ชนาภรณ์ โกรษณ, วิชาสินี วุฒิศรสถล และธีระพัฒน์ สมบัติวงศ์. (2543). เทคโนโลยี และโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมหล่อ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
- พยุร เกตุกราย. (2523). การหล่อโลหะ ภาคการผลิต. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น)
- มนัส สติรจินดา. (2543). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. (พิมพ์ครั้งที่ 4). สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มานพ ตันตระกูล. (2536). วัสดุและวิศวกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 1). สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
- แมน อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. (2544). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ.
- วิรุจน์ บัวงาม. เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2554 จาก, <http://learners.in.th/blog/wirut/325228>
- สิตลา รัตนช้อน และสิริพร โรจนนันต์. (2552). โครงสร้างและความแข็งของเงินสเตอร์ลิงผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านการบ่มแข็ง. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- สุทธาวัดย์ อิมอุไร, ธรณินทร์ ไชยเรืองศรี, ชัญชนา ธนชยานนท์, จุลเทพ ขจรไชยกุล และ J.T.H. Pearce. (2550). โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2554 จาก,
http://biology888.blogspot.com/2010_07_01_archive.html
- ASTM D785. (2010). Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials. (Vol. 08.01)
- ASM Handbook. (1990). Heat Treatment. (vol. 4). ASM International.Boehm
- Raymond A. Higgins. (1993). Engineering Metallurgy - Applied Physical Metallurgy. (Vol. 6)
- A.M. Hassan, O.M. Bataineh, K.M. Abed (2008). Materials Processing Technology. The Effect of Time and Temperature on the Precipitation Behavior and Hardness of Al-4wt%Cu Alloy, Page 343-349
- Metal Hand Book. ASTM B 108. (1948). Cleveland. American Society for Metal, Page 1159

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- J. Pearce. (2002). Heat Treatment of Aluminium Alloys. (vol. 48). Metal Casting Technologies.
- R. Askeland. (1994). The Science and Engineering of Materials. Dispersion strengthening by Phase Transformation and Heat Treatment, Page 451-492
- T. Nakajima, M. Takeda, T. Endo (2003). Accelerated Coarsening of Precipitates in Crept Al-Cu Alloys. Department of Materials Engineering, Yokohama National University
- Z. Feng, Y. Yang, B. Huang, X. Luo, J. Ru (2010). Precipitation Process Along Dislocations in Al-Cu-Mg Alloy During Artificial Aging. School of Materials, Northwestern Polytechnical University





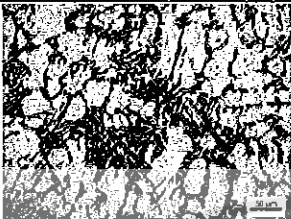
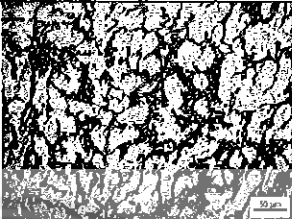
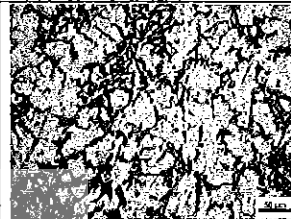
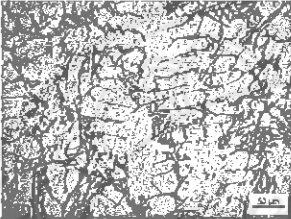
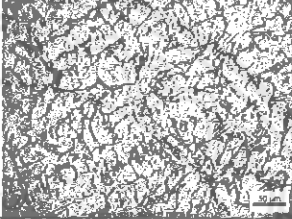
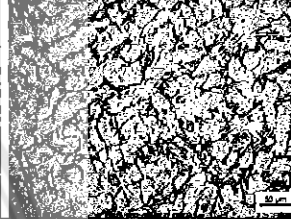
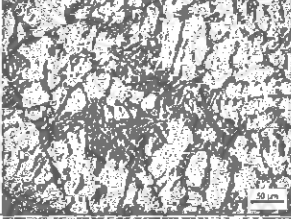
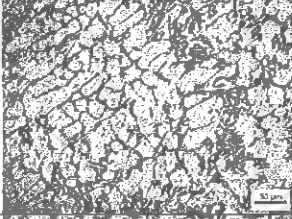
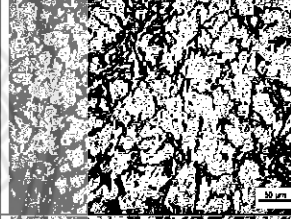

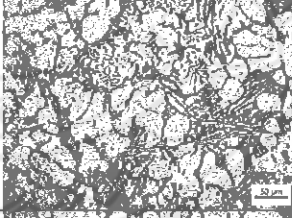
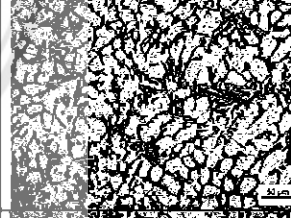

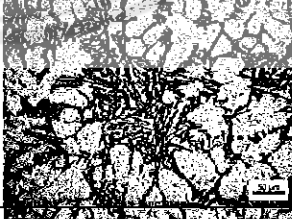
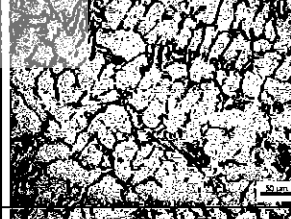
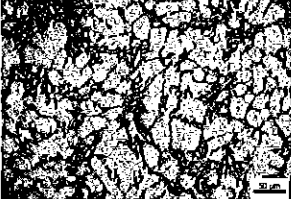
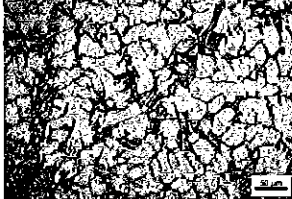

ภาคผนวก ก

**โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงก่อน และหลังผ่าน
กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก**

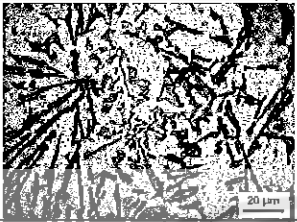
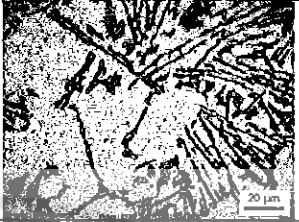

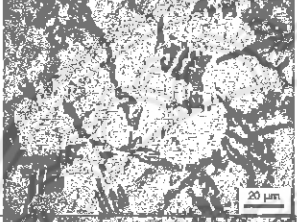
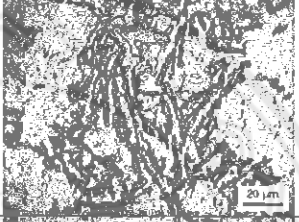
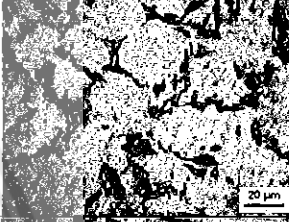


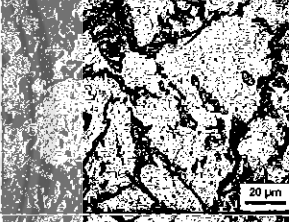

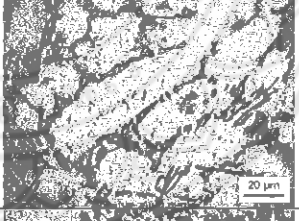

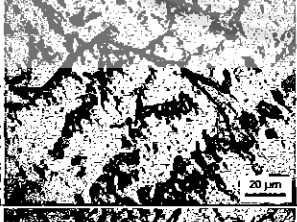

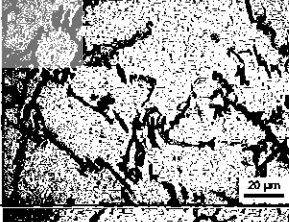
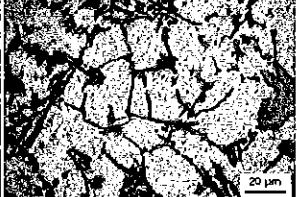

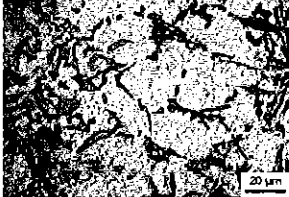
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
1	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			

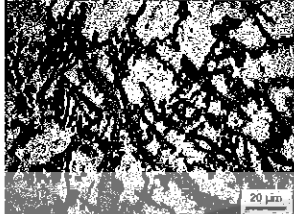
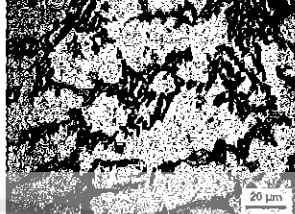
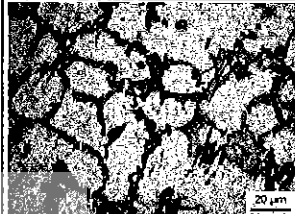

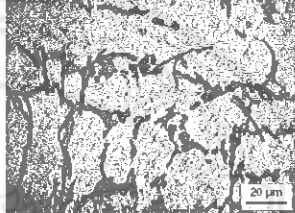

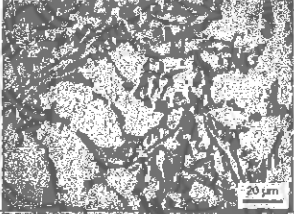
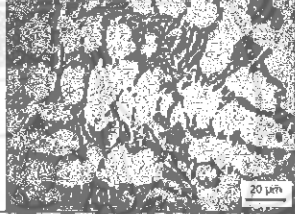
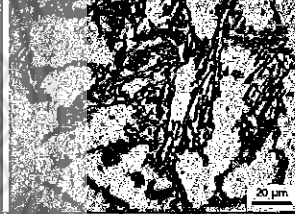
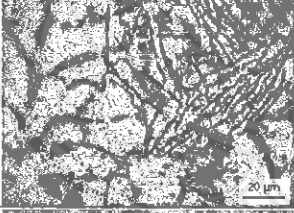
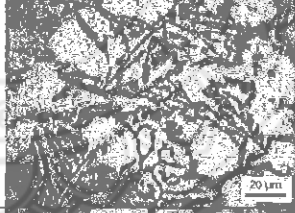
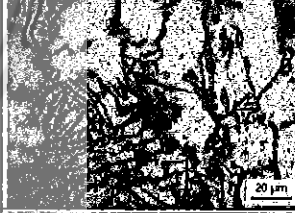
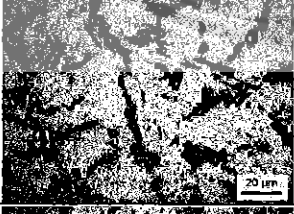
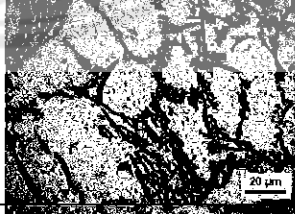




ตารางที่ ก.1 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
1	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			

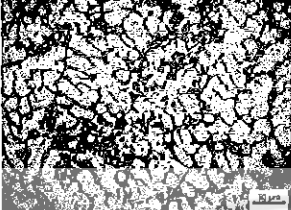
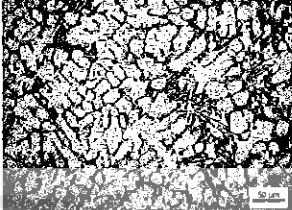
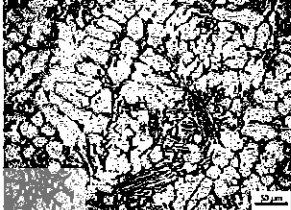
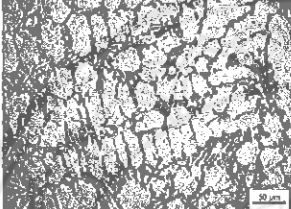
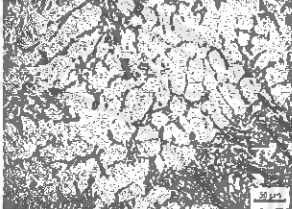
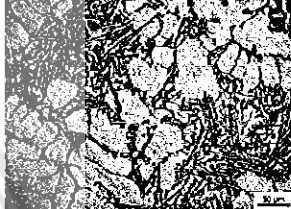
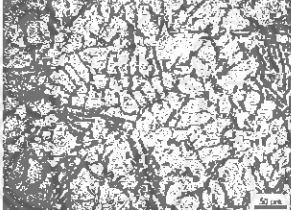
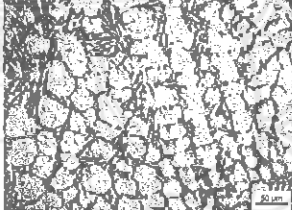
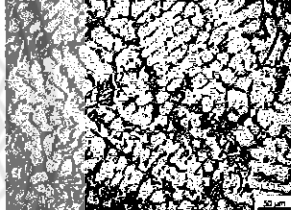
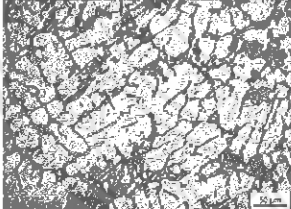
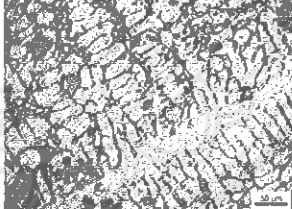

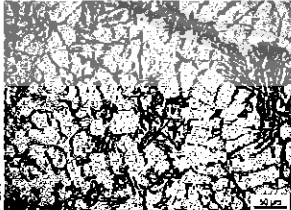
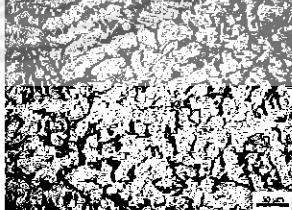
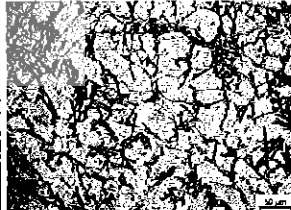
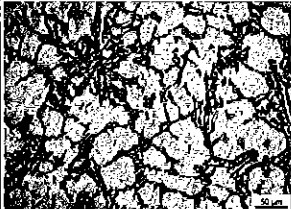

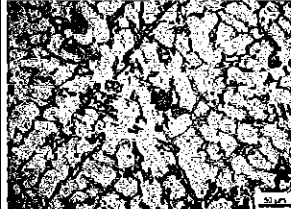
ตารางที่ ก.1 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
1	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			

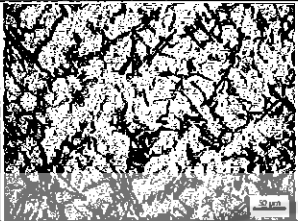
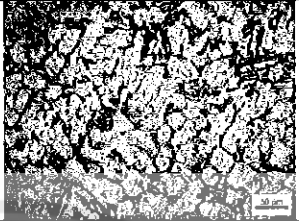
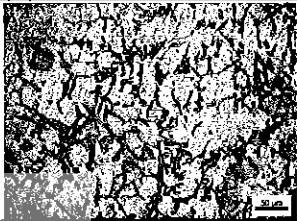
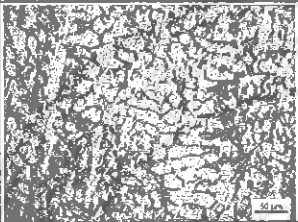
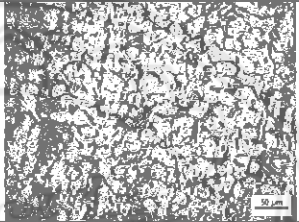
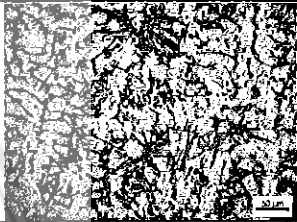
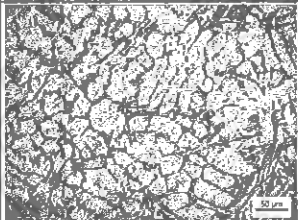
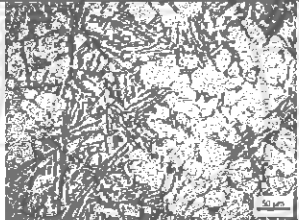
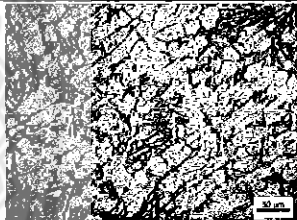
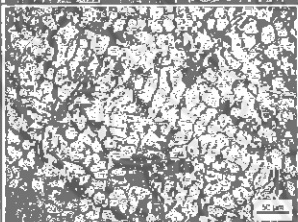
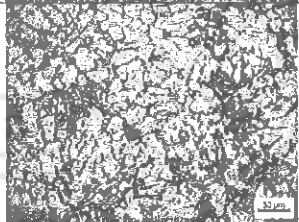
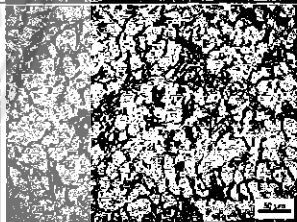
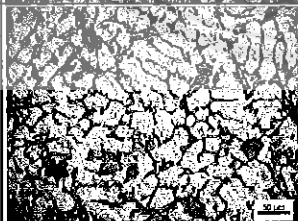
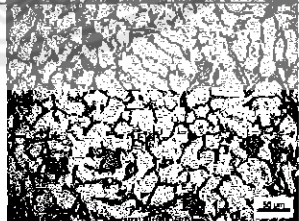
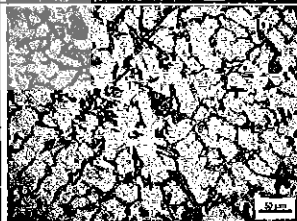
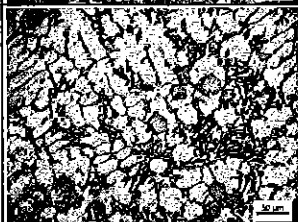
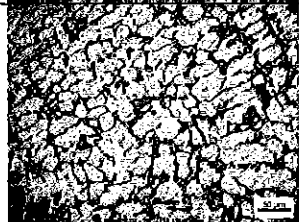

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
1	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			

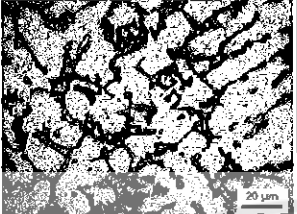
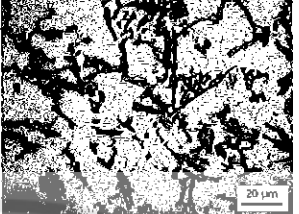

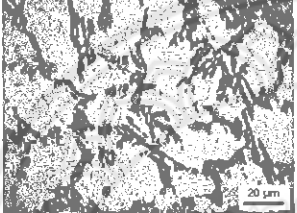
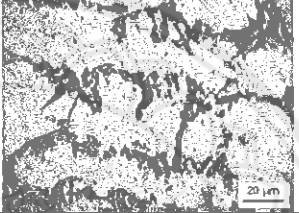
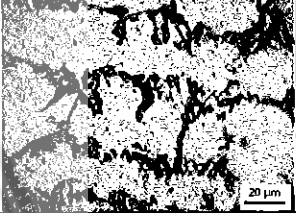
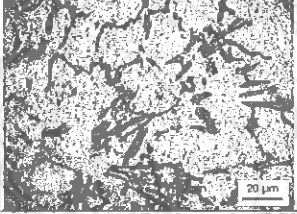
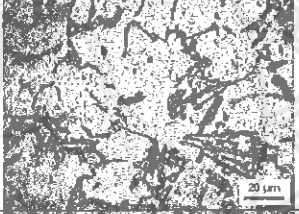
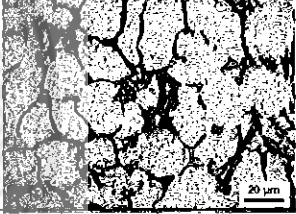
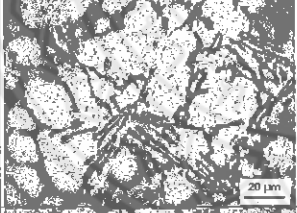
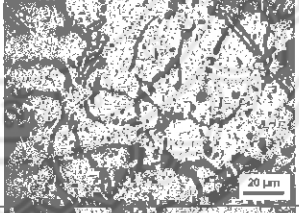
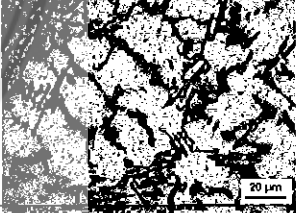



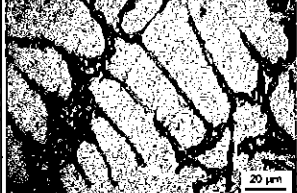


ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
2	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			

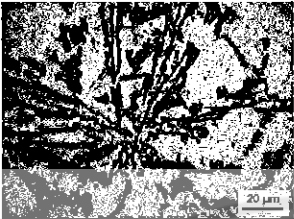
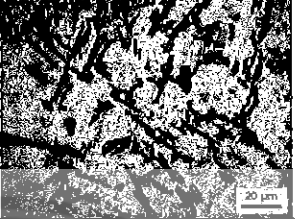
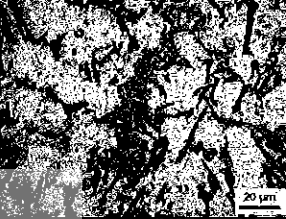
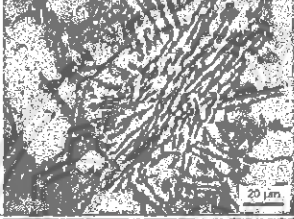
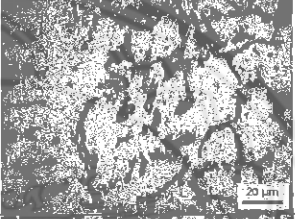
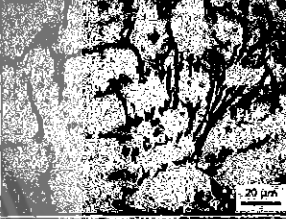
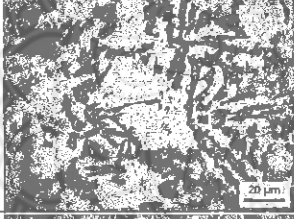

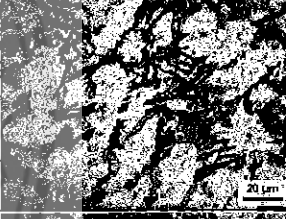
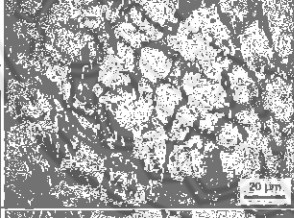
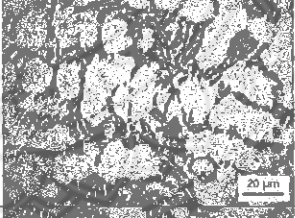
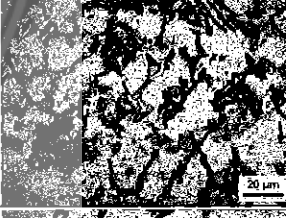

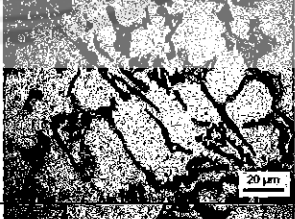




ตารางที่ ก.2 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
2	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			

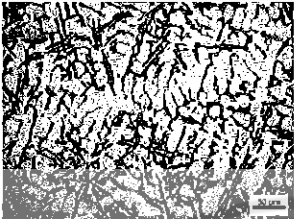

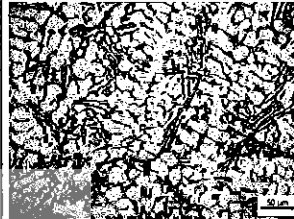

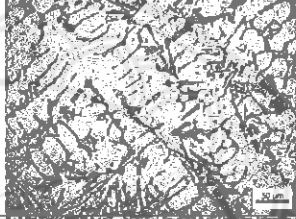
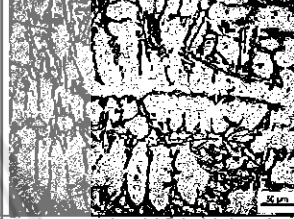
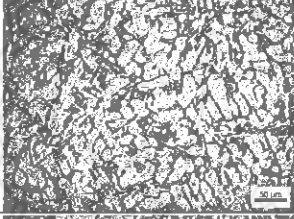
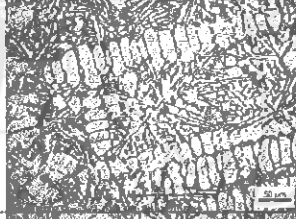


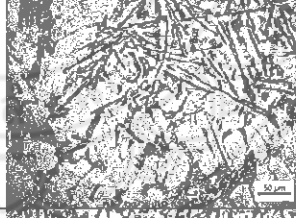

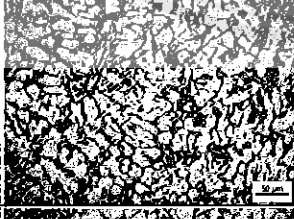
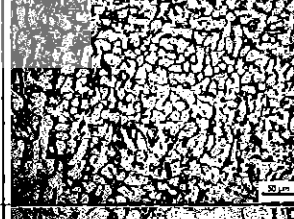



ตารางที่ ก.2 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
2	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			

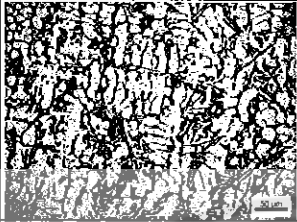
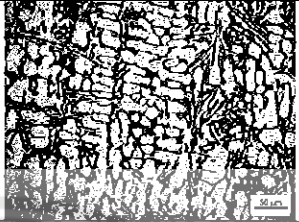

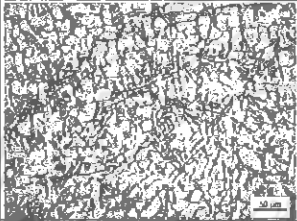
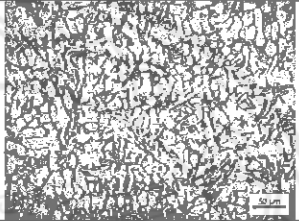
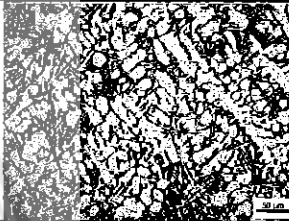
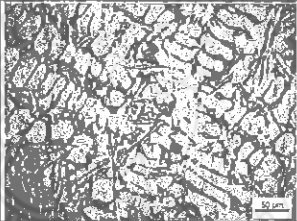
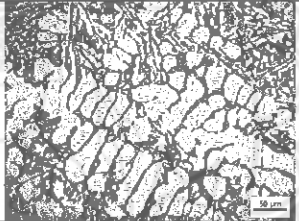
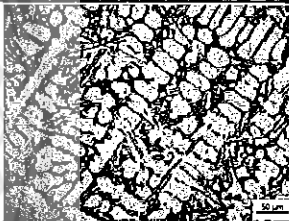
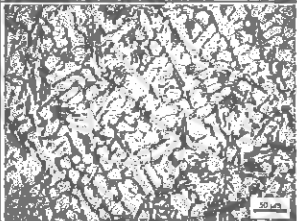
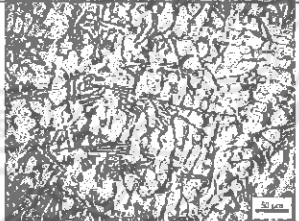
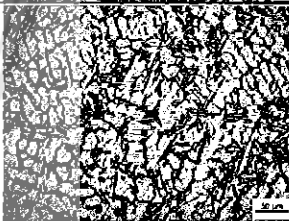
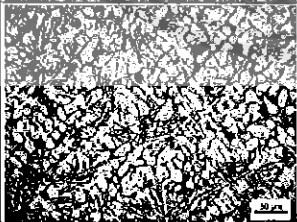
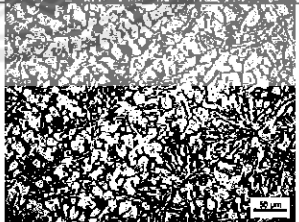
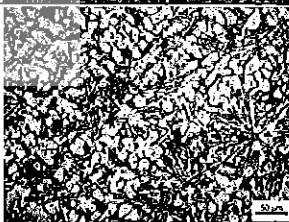
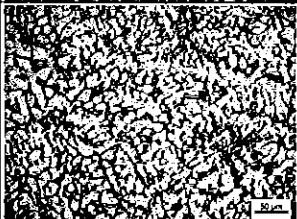
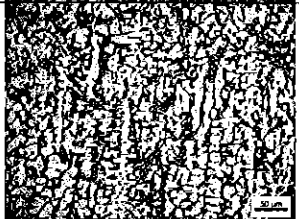

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
2	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			

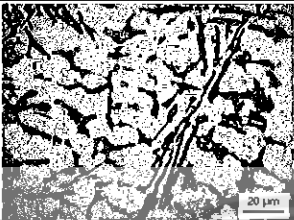
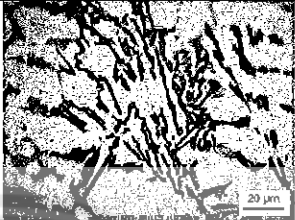

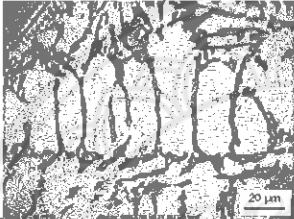
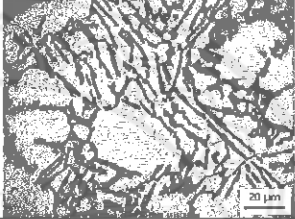
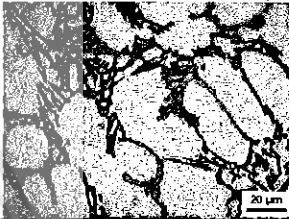
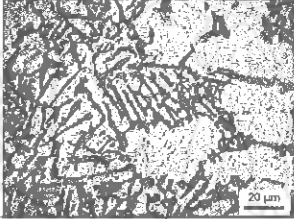
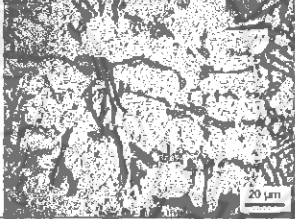

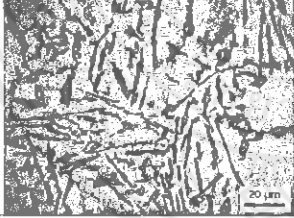
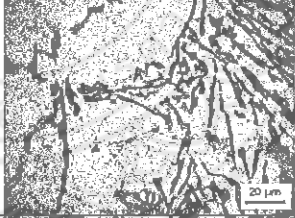


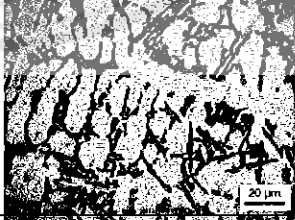

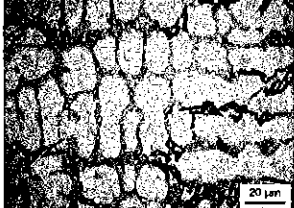

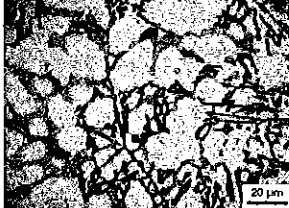
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
4	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			


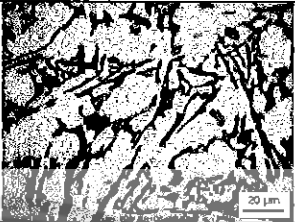
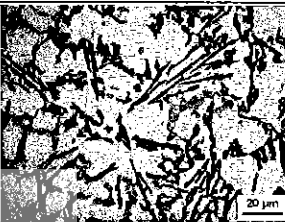
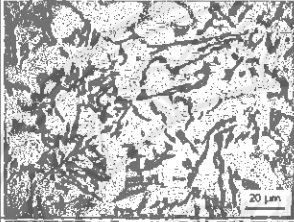
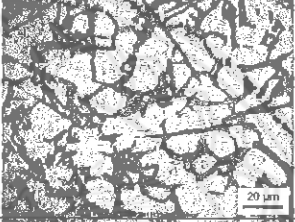
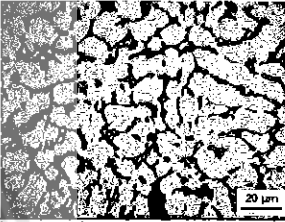
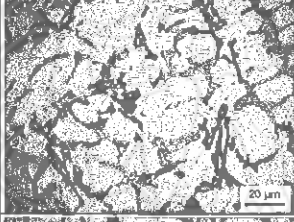
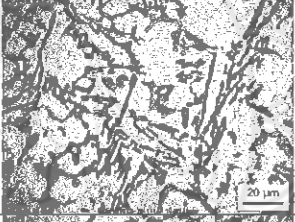
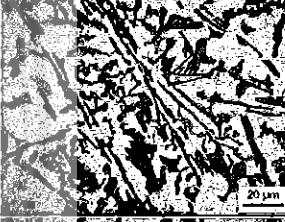
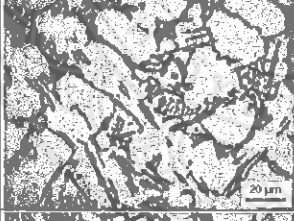
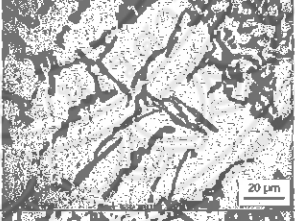
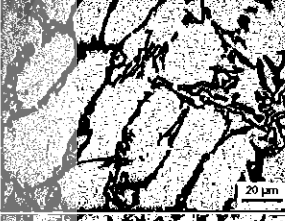
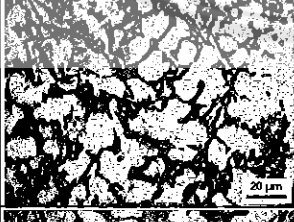
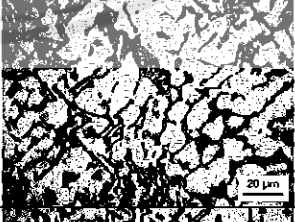
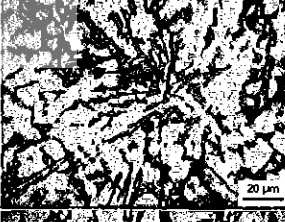


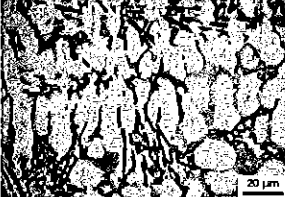
ตารางที่ ก.3 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
4	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			



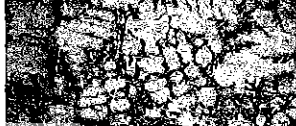
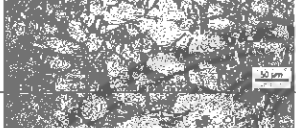
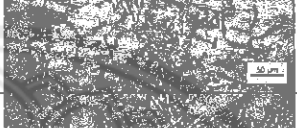
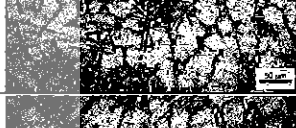
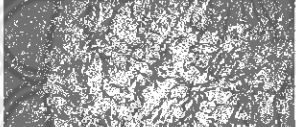
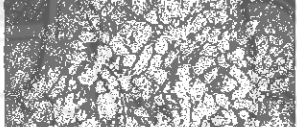


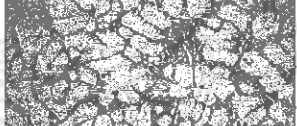

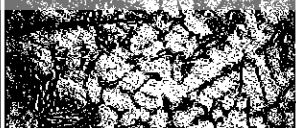

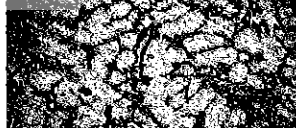


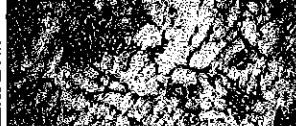
ตารางที่ ก.3 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
4	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			

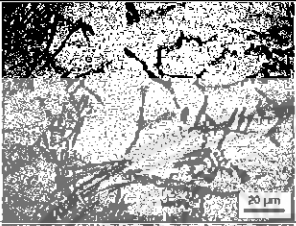
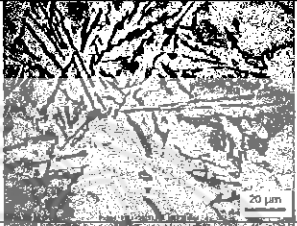
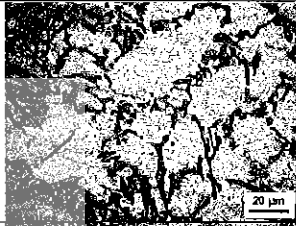
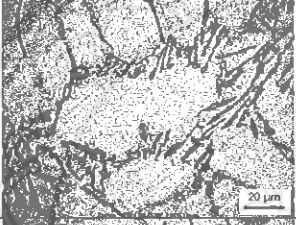
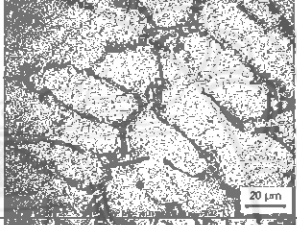
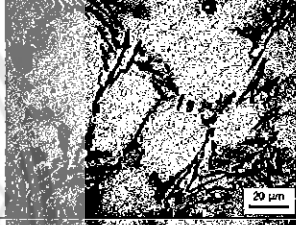

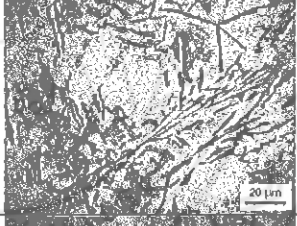

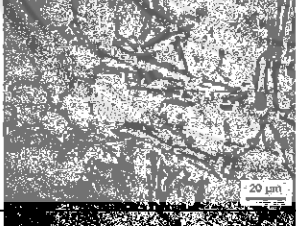


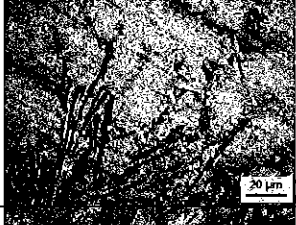
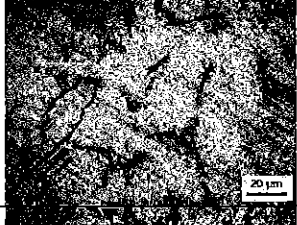

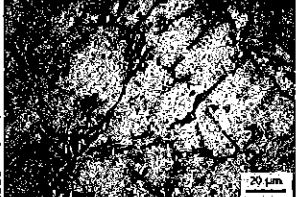
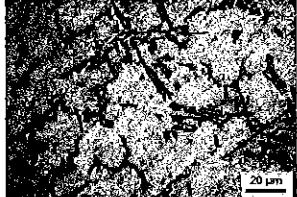

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดง โดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
4	7			
	8			
	9			
	10			
	11			
	12			

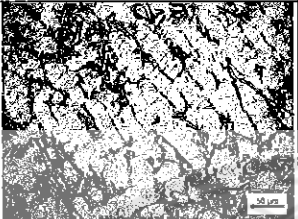
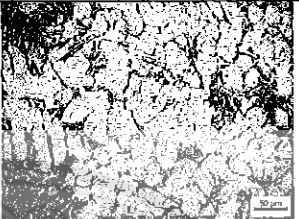
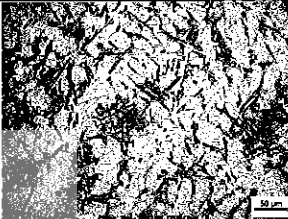
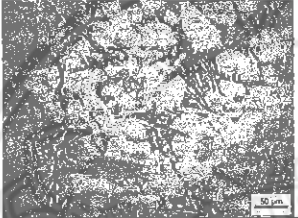
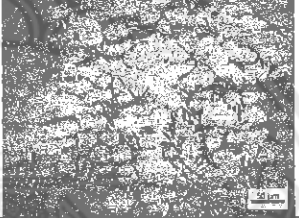
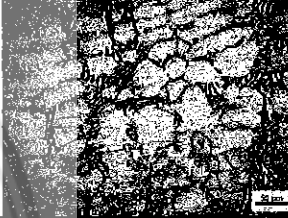
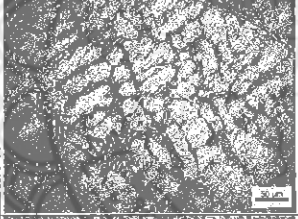

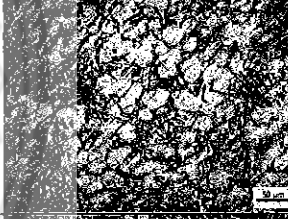

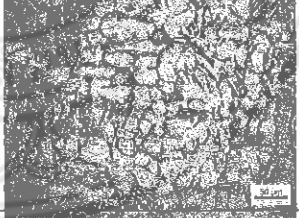
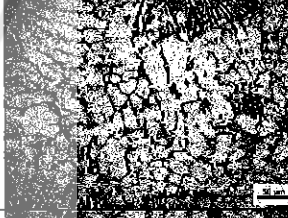
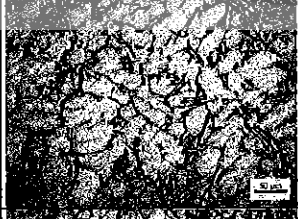



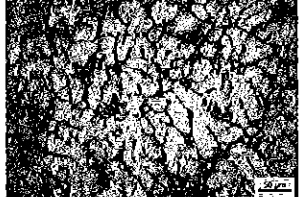

ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

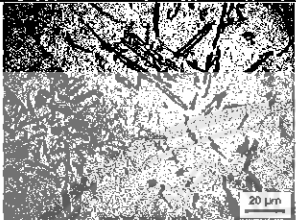

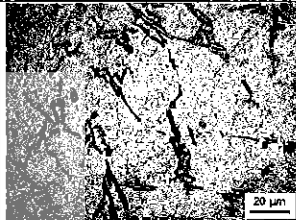

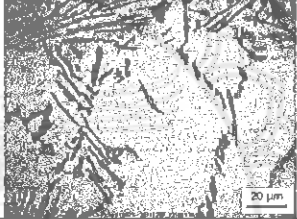
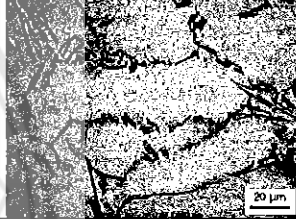


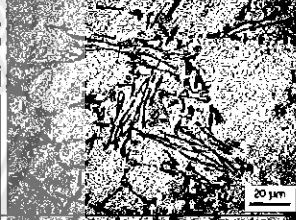
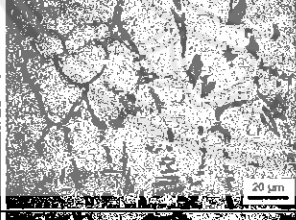
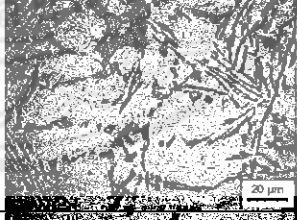







ตารางที่ ก.4 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิป้อนแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง

อุณหภูมิ ป้อนแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

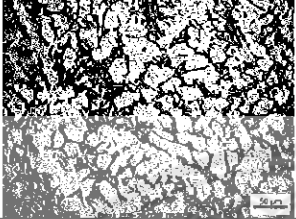
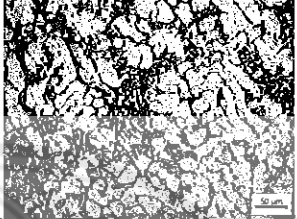
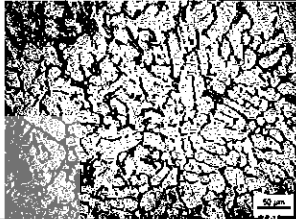
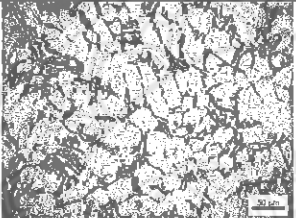


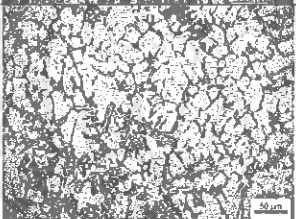
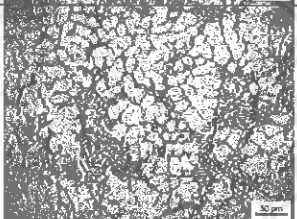
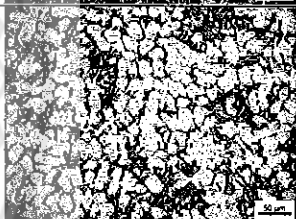
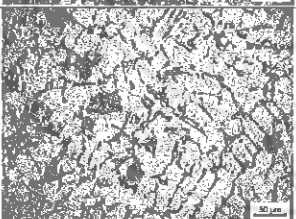

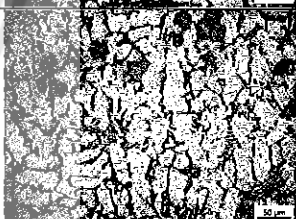
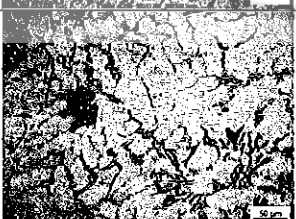
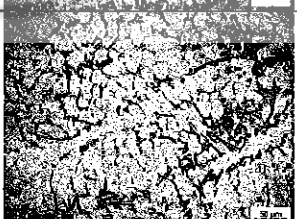

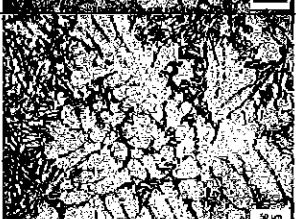


ตารางที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

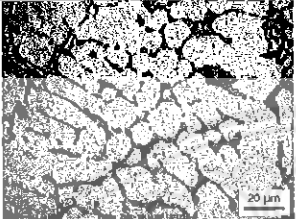
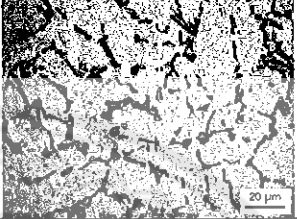
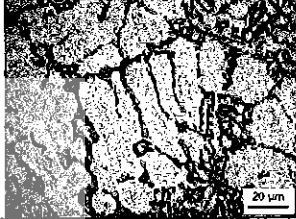
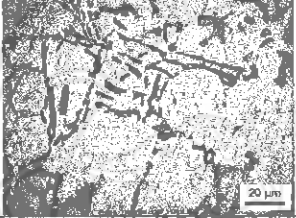

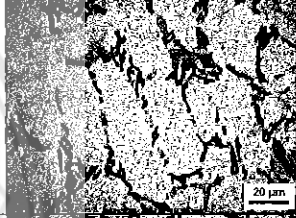
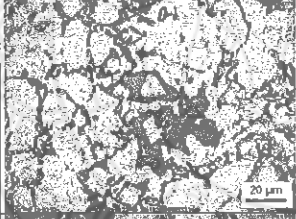

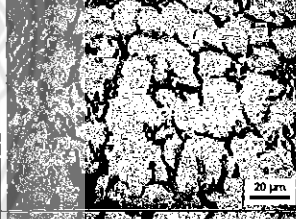
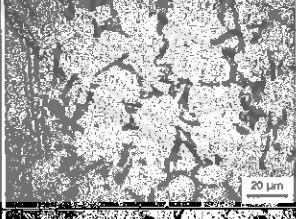
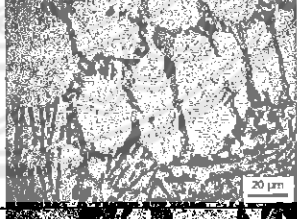
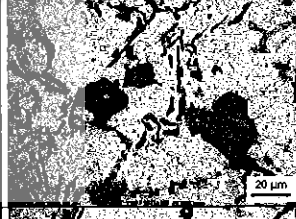






ตารางที่ ก.5 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

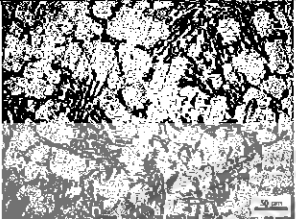
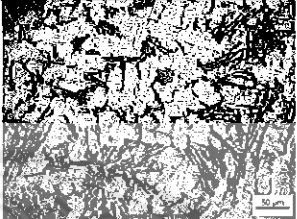
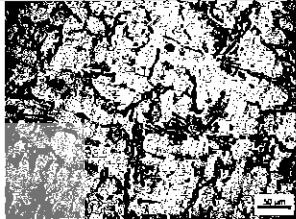
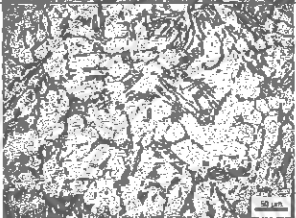
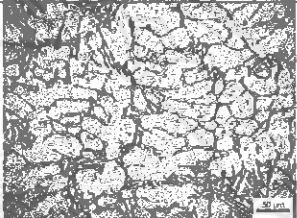
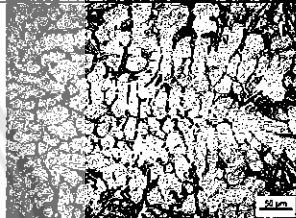

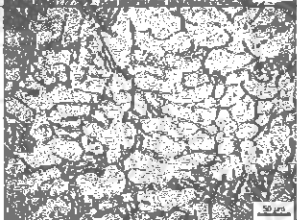
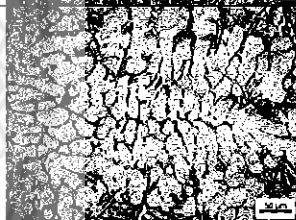

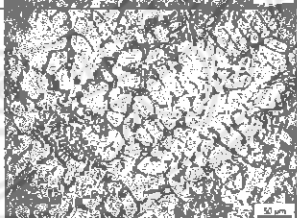
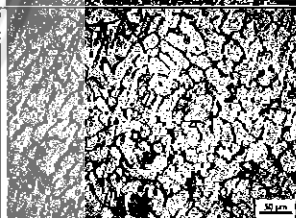
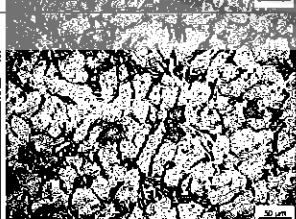
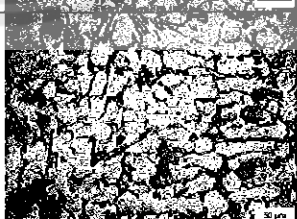
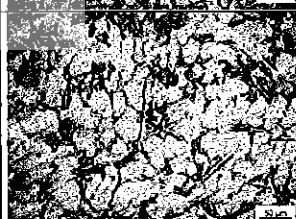
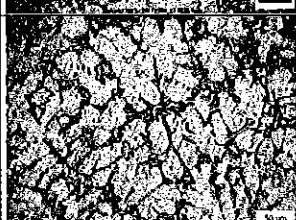
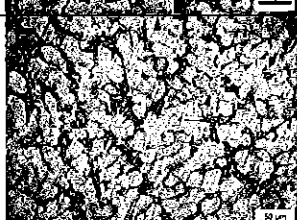
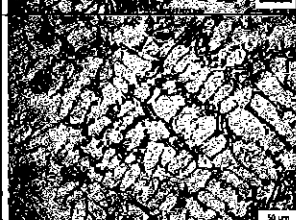
ตารางที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

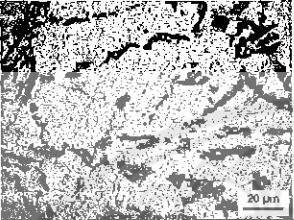
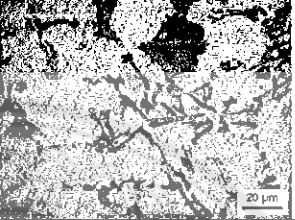
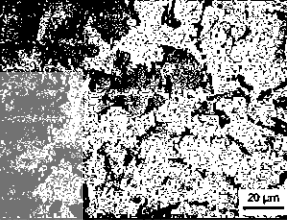
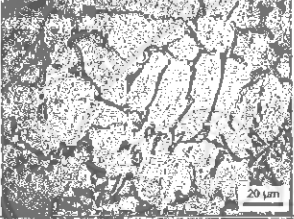
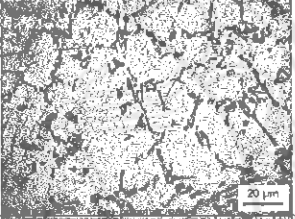
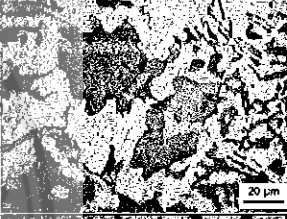
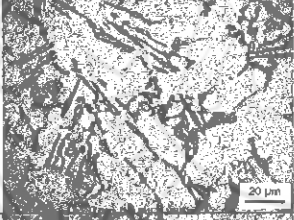
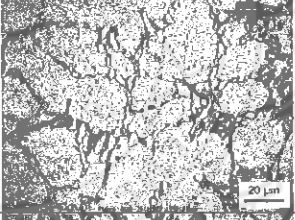
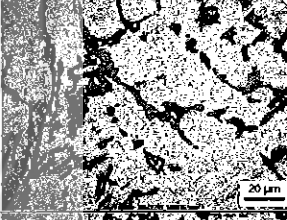
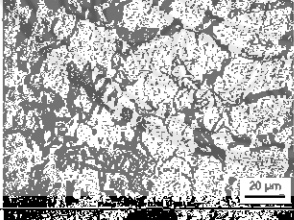
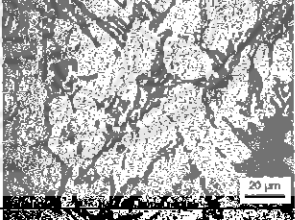
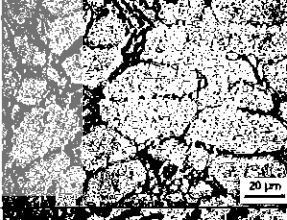

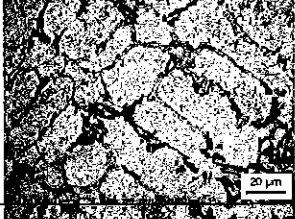
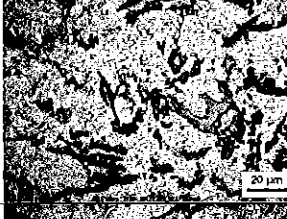


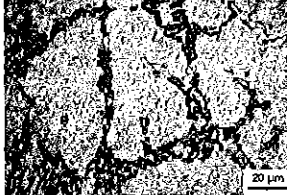
ตารางที่ ก.6 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

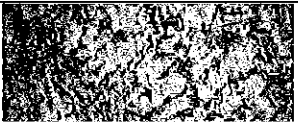
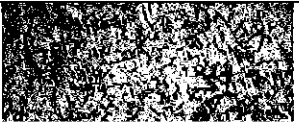




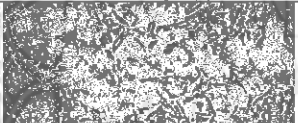
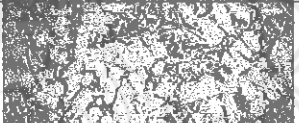

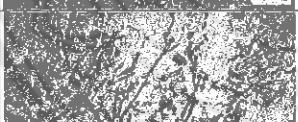
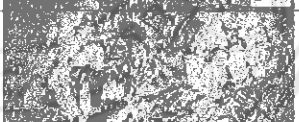


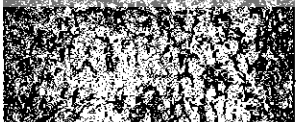




ตารางที่ ก.7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิป่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง

อุณหภูมิ ป่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

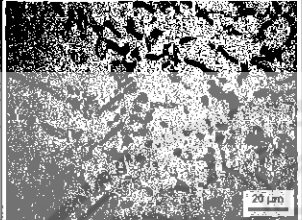
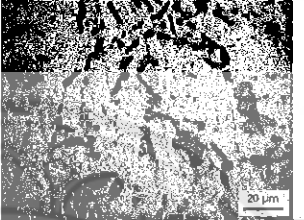
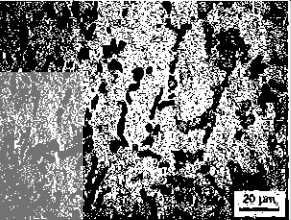
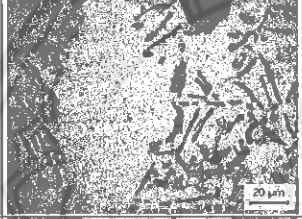
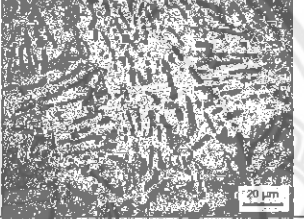
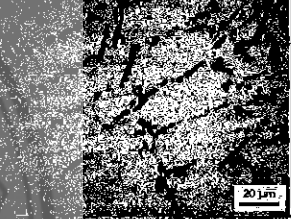
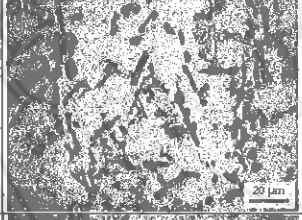
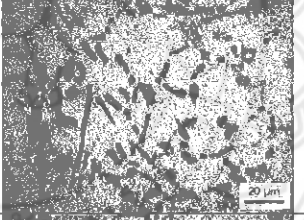

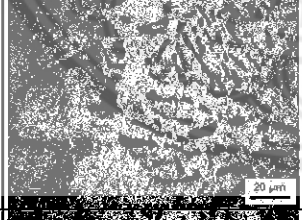
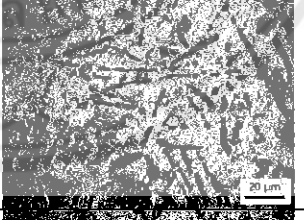


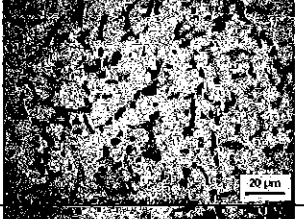

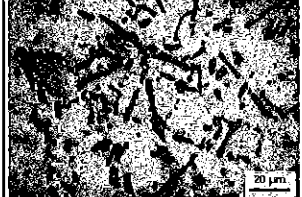

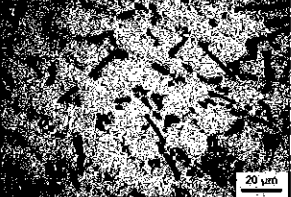
ตารางที่ ก.7 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

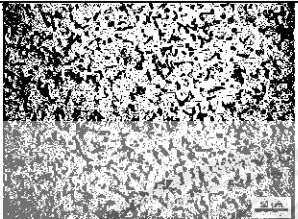
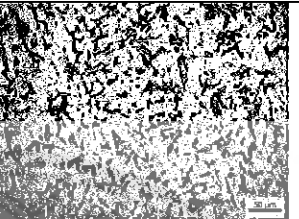
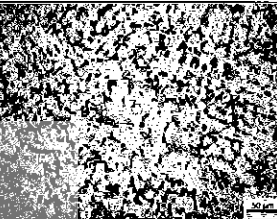
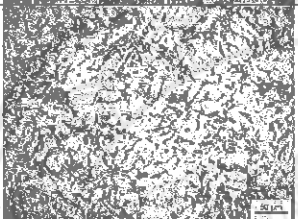
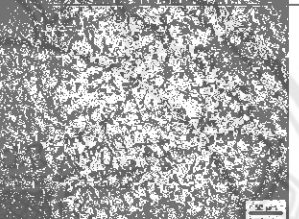
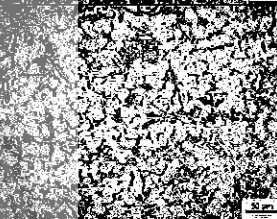
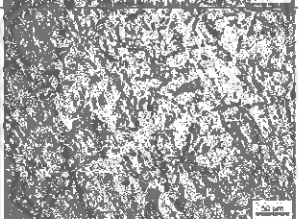
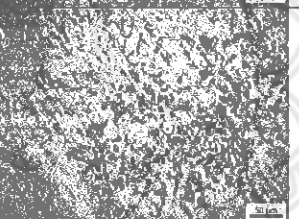
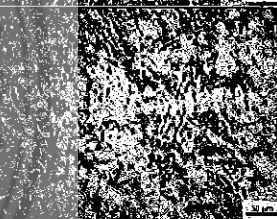


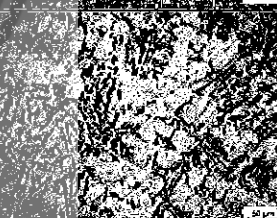
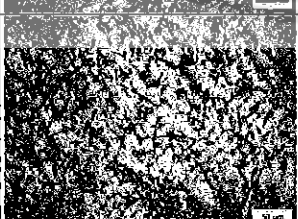
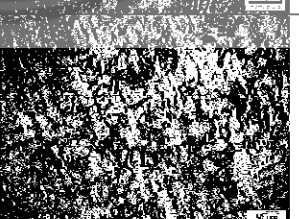
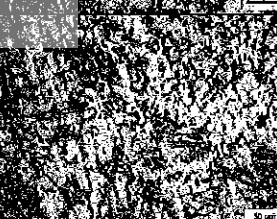
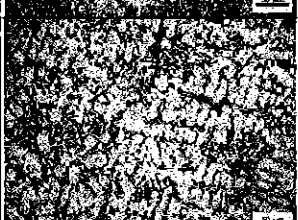

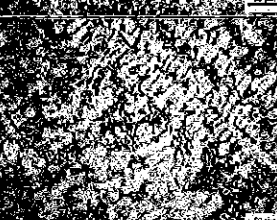
ตารางที่ ก.8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

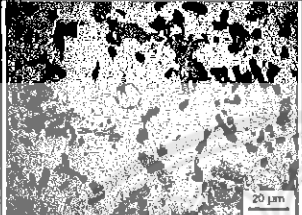
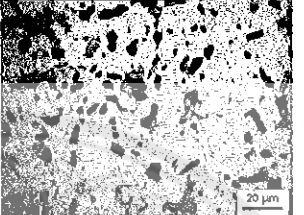
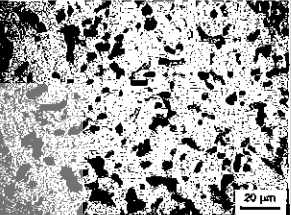
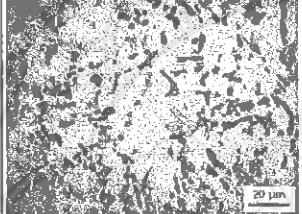
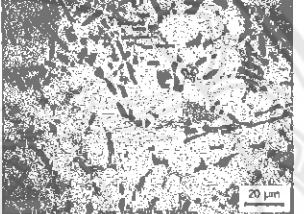
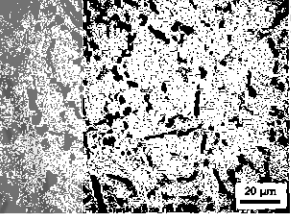
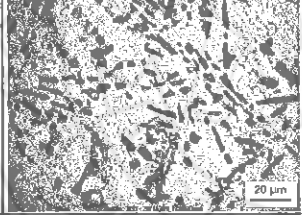
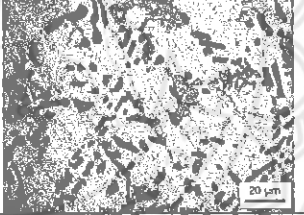

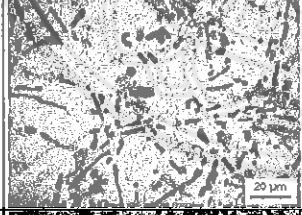
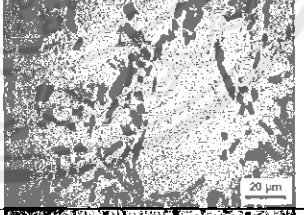
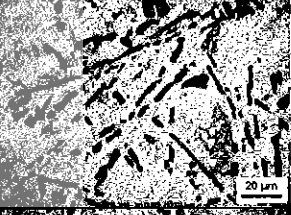
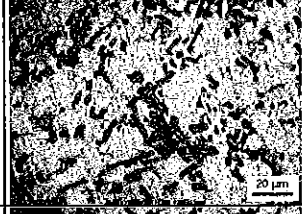
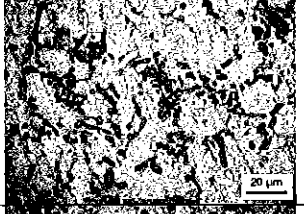

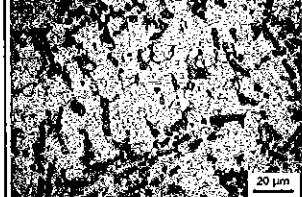
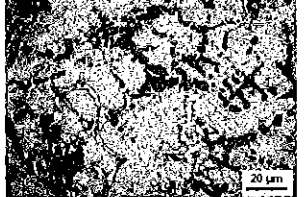
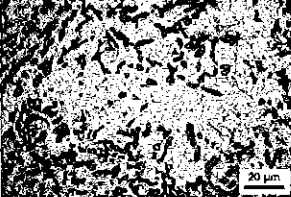
ตารางที่ ก.8 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

ตารางที่ ก.9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดง ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 200 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีอัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 40 ชั่วโมง

อุณหภูมิ บ่มแข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	กำลังขยาย 500 เท่า		
		รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
120	1			
	2			
170	1			
	2			
220	1			
	2			



ภาคผนวก ข

**ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงก่อน และหลังผ่าน
กระบวนการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก**

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดงโดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น	ความแข็งทั้ง 3 จุด			ค่าความ แข็งเฉลี่ย (HB)	ค่าความแข็ง เฉลี่ยทั้งหมด (HB)
1	1	87.95	89.02	91.25	89.41	89.76
	2	87.95	91.82	90.12	89.97	
	3	87.95	93.59	90.12	90.56	
	4	89.02	92.41	92.41	91.28	
	5	87.43	91.25	85.88	88.19	
	6	93.59	91.25	91.25	92.03	
	7	92.41	90.12	93.59	92.04	
	8	90.12	89.02	93.59	90.91	
	9	90.12	91.25	90.68	90.69	
	10	85.88	89.02	89.02	87.98	
	11	82.95	84.88	83.43	83.76	
	12	84.88	93.59	92.41	90.29	
2	1	110.61	107.35	111.45	109.80	108.29
	2	112.31	112.31	110.61	111.74	
	3	119.67	108.96	109.77	112.80	
	4	104.29	107.35	105.80	105.81	
	5	101.39	110.61	107.35	106.45	
	6	104.29	107.35	108.96	106.86	
	7	108.96	98.65	101.39	103.00	
	8	107.35	108.96	105.04	107.11	
	9	110.61	119.67	108.96	113.08	
	10	108.96	113.18	110.61	110.91	
	11	101.39	101.39	102.82	101.86	
	12	110.61	108.96	110.61	110.06	
4	1	125.86	158.70	125.86	136.81	124.41
	2	110.61	115.87	119.67	115.38	
	3	114.06	130.36	120.66	121.69	
	4	117.74	121.67	123.73	121.05	
	5	125.86	123.73	123.73	124.44	
	6	114.06	128.07	132.73	124.95	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดง ร้อยละ 1, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ทองแดงโดย น้ำหนัก (ร้อยละ)	ชั้น	ความแข็งทั้ง 3 จุด			ค่าความ แข็งเฉลี่ย (HB)	ค่าความ แข็งเฉลี่ย ทั้งหมด (HB)
4	7	117.74	128.07	128.07	124.63	124.41
	8	117.74	123.73	135.19	125.55	
	9	121.67	121.67	123.73	122.35	
	10	110.61	119.67	122.69	117.66	
	11	137.74	143.14	126.96	135.94	
	12	117.74	123.73	125.86	122.44	



ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง

เวลาบ่ม แข็ง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิบ่ม แข็ง (องศา เซลเซียส)	ชั้น ที่	ความแข็งทั้ง 3 จุด			ค่าความ แข็งเฉลี่ย (HB)	ค่าความ แข็งเฉลี่ย ทั้งหมด (HB)
25	120	1	118.49	128.28	125.73	124.17	123.09
		2	120.86	123.25	121.94	122.02	
	170	1	123.25	123.25	125.73	124.08	124.50
		2	123.25	128.28	123.25	124.93	
	220	1	120.84	118.49	123.25	120.86	118.91
		2	116.20	118.49	116.20	116.96	
40	120	1	123.25	130.90	125.73	126.63	124.28
		2	128.28	125.73	111.80	121.94	
	170	1	123.25	128.28	125.73	125.75	126.17
		2	125.73	128.28	125.73	126.58	
	220	1	113.97	116.20	113.97	114.71	114.73
		2	113.97	118.49	111.80	114.75	

ตารางที่ ข.4 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง

เวลาบ่ม แข็ง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ชั้น	ความแข็งทั้ง 3 จุด			ค่าความ แข็งเฉลี่ย (HB)	ค่าความ แข็งเฉลี่ย ทั้งหมด (HB)
25	120	1	165.27	165.27	165.27	165.27	164.67
		2	165.27	161.66	165.27	164.07	
	170	1	165.27	172.84	185.15	174.42	173.11
		2	161.66	180.91	172.84	171.81	
	220	1	151.47	151.47	165.27	156.07	155.98
		2	154.76	158.16	154.76	155.89	
40	120	1	158.16	158.16	172.84	163.05	173.11
		2	180.91	180.91	180.91	180.91	
	170	1	165.27	172.84	172.84	170.32	175.64
		2	180.91	176.81	185.15	180.96	
	220	1	145.16	142.14	145.16	144.15	148.94
		2	158.16	154.76	148.27	153.73	



ภาคผนวก ค

ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียมไนต์ของโลหะ
ผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงก่อน และหลังผ่านกระบวนการตกตะกอน
ของอนุภาคขนาดเล็ก

ตารางที่ ค.1 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ (θ - CuAl_2) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 368 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง

เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชั้นที่	ก่อน	หลัง	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ - CuAl_2 ที่ละลายในเนื้อพื้น
			ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ - CuAl_2	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ - CuAl_2	
25	120	1	45.98	37.99	6.73
		2	41.21	35.74	
	170	1	46.72	30.54	13.7
		2	42.29	31.07	
	220	1	41.97	38.27	4.42
		2	37.95	32.82	
40	120	1	42.90	33.52	7.38
		2	38.79	33.41	
	170	1	40.03	35.53	6.76
		2	43.62	34.61	
	220	1	38.17	31.31	5.89
		2	35.07	30.15	
ค่าเฉลี่ยทั้งหมด			41.23	33.75	7.48

ตารางที่ ค.2 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียม (θ-CuAl₂) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง

เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชั้นที่	ก่อน	หลัง	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ-CuAl ₂ ที่ละลายในเนื้อพื้น
			ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ-CuAl ₂	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ-CuAl ₂	
25	120	1	35.77	30.97	9.23
		2	42.82	29.16	
	170	1	47.61	37	17.09
		2	49.42	25.85	
	220	1	38.22	20.27	10.26
		2	36.17	33.63	
40	120	1	42.07	33.39	13.87
		2	43.92	24.86	
	170	1	37.24	36.74	3.34
		2	43.92	37.74	
	220	1	52.15	34.77	3.34
		2	40.17	37.99	
ค่าเฉลี่ยทั้งหมด			41.23	33.75	42.46

ตารางที่ ค.3 ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ (θ - CuAl_2) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส เวลา 65 นาที อุณหภูมิบ่มแข็ง 120, 170 และ 220 องศาเซลเซียส เวลา 25 และ 40 ชั่วโมง

เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชิ้นที่	ก่อน	หลัง	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ - CuAl_2 ที่ละลายในเนื้อพื้น
			ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ - CuAl_2	ร้อยละโดยพื้นที่ของเฟส θ - CuAl_2	
25	120	1	39.82	31.63	8.92
		2	41.24	31.59	
	170	1	49.66	32.99	13.25
		2	41.43	31.60	
	220	1	43.49	35.98	5.64
		2	39.11	35.34	
40	120	1	45.04	24.28	16.98
		2	45.87	32.87	
	170	1	40.93	32.32	10.56
		2	47.71	35.21	
	220	1	46.43	43.97	7.17
		2	43.50	31.62	
ค่าเฉลี่ยทั้งหมด			41.23	33.75	43.69

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวจิรัชยา กอบธัญกิจ
ภูมิลำเนา 8/2 หมู่ 3 ต.หนองกลางดง อ.ทัพทัน
จ.อุทัยธานี 61120

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนทัพทันอนุสรณ์
จ.อุทัยธานี
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: labumba_haha@windowslive.com



ชื่อ นางสาวปภากานต์ ทาเอื้อ
ภูมิลำเนา 393 หมู่ 2 ต.ท่ามะเขือ อ.คลองขลุง
จ.กำแพงเพชร 62120

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครสวรรค์
จ.นครสวรรค์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: tpaphakarn@gmail.com