

ชื่อหัวข้อโครงการ	การผลิตวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม/อะลูมินาด้วยกระบวนการ กวนหล่อ		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายณัฐพงษ์	ชัยธนะกุลมงคล	รหัส 52363240
	นางสาวรจนา	สิงประเสริฐ	รหัส 52363448
	นายอำนาจ	กัลดพิก	รหัส 52363639
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ทศพล	ตรีรุจิราภาพงศ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2555		

บทคัดย่อ

การศึกษาโครงการนี้เพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 จากล้อยแม็กกับอะลูมินา และศึกษาโครงสร้างจุลภาค รวมถึงความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อด้วยแบบหล่อถาวร โดยผสมอะลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร ลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมปริมาณร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 ที่ความเร็วในการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 วินาที โดยใช้อุณหภูมิเท 690 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณอะลูมินา พบว่าชิ้นงานมีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และอนุภาคของอะลูมินาที่กระจายตัวอยู่ในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน การกระจายตัวของอะลูมินาจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอะลูมินา โดยชิ้นงานที่ผสมอะลูมินาร้อยละ 1.0 มีอะลูมินากระจายอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมได้ร้อยละ 0.39 และความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการผสมอะลูมินาในโลหะผสมอะลูมิเนียม ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มเป็น 117.630 HB จากโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ความแข็ง 108.783 HB

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอแสดงความขอบพระคุณบุคคลผู้มีพระคุณ โดยเฉพาะ อาจารย์ทศพล ตรีจริยาภางค์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำทั้งทางด้านภาคทฤษฎี ภาคปฏิบัติ รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนดูแลติดตามโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และอาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอนโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงม่วง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสานวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนให้ผู้จัดทำโครงการเป็นคนดีของสังคม

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนค่าใช้จ่ายและให้กำลังใจตลอดมาจนสามารถทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความรัก คำปรึกษา และความช่วยเหลือขณะที่ศึกษาและทำโครงการเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การดูแลตลอดการทำโครงการจนสำเร็จการศึกษา หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ ขอมอบความดีให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม
นายณัฐพงษ์ ชัยชนะกุลมงคล
นางสาวรจนา สิงประเสริฐ
นายอำนาจ กลัดฟัก

มีนาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบ (Composites Materials).....	4
2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม.....	8
2.3 อะลูมินา (Alumina, Al ₂ O ₃).....	12
2.4 การเปียกผิว (Wettability).....	13
2.5 กลไกการเพิ่มความแข็งแรง (Strengthening Mechanisms).....	15
2.6 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification).....	19
2.7 กระบวนการกวนหล่อ.....	23
2.8 กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting).....	24
2.9 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ.....	26
2.10 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในการตรวจสอบ.....	27
2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	28
2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope).....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	35
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงการ	35
3.2 วัตถุประสงค์ และอุปกรณ์	36
3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์	41
4.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม	41
4.2 ลักษณะสัณฐานของอะลูมินา	41
4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม/อะลูมินา	43
4.4 ความแข็ง	47
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	49
5.1 บทสรุป	49
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา	49
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข	49
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก	54
ภาคผนวก ข	63
ภาคผนวก ค	65
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 มาตรฐานของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมการหล่อโลหะ.....	11
2.2 สมบัติของอะลูมินา	12
2.3 มุมสัมผัส และพลังงานที่ผิวหน้าร่วมระหว่างวัสดุเซรามิก และวัสดุโลหะที่ได้จากการคำนวณ การทดลอง	15
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของล่อแม็ก.....	36
ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	54
ก.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	55
ก.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	56
ก.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	57
ก.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	58
ก.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	59
ก.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	60
ก.8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	61
ข.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณของอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	63
ค.1 พื้นที่อะลูมินาในชิ้นงานที่ ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อเติมปริมาณของอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.25, 0.50, และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม	65
ค.2 พื้นที่อนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 1 ไมโครเมตร	66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเนื้อพื้นแบบต่าง ๆ	6
2.2 วัสดุเชิงประกอบแบบชั้น	7
2.3 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกบแบบแซนวิช	8
2.4 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน	11
2.5 แสดงโครงสร้างของอัลฟาอะลูมินา	13
2.6 สมบัติการเปื่อย และมุมสัมผัสระหว่างของเหลว และของแข็ง	14
2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ที่อัตราการเย็นตัวช้า ๆ ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน และการเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก	17
2.8 กลไกการโอบรอบดิสโลเคชัน	18
2.9 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว	19
2.10 พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง ΔG_T เทียบกับรัศมีของนิวเคลียสที่เกิดจากการแข็งตัวของน้ำโลหะโดยที่รัศมีของอนุภาค $> r^*$ นิวเคลียสจึงโตต่อไปได้	20
2.11 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์	20
2.12 ถ้าของเหลวผ่าน Undercooling ของแข็งที่เกิดขึ้นที่ Interphase ระหว่างของเหลว และของแข็งสามารถเติบโตเป็นเดนไดรต์ ความร้อนแฝงของการหลอมละลายจะสูญเสียไปจากของแข็งทำให้อุณหภูมิของของเหลวเพิ่มขึ้น และทำให้ของเหลวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงอุณหภูมิระดับการแข็งตัว.....	22
2.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเดนไดรต์ในเหล็กกล้า (ภาพขยาย 15 เท่า)	27
2.14 การเกิดเกรนของชิ้นงานหล่อขณะแข็งตัว	23
2.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)	27
2.16 เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)	29
2.17 การแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล	30
2.18 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	35
3.2 แบบหล่อถาวร	37
3.3 การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร	38
3.4 แสดงขนาดของชิ้นงาน และบริเวณที่ขีดกระดากทราย	39
3.5 แสดงตำแหน่งรอยกดชิ้นงาน	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356..... 41
4.2	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO 1455VP) แสดงลักษณะอนุภาคของอะลูมินา ขนาดกำลังขยาย 10000 เท่า..... 42
4.3	ลักษณะอนุภาคของอะลูมินาที่พบในชิ้นงานที่เติมอะลูมินาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการ..... 43
4.4	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ปริมาตรร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม..... 44
4.5	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ปริมาตรร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม..... 45
4.6	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ปริมาตรร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม..... 46
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะลูมินาที่เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 กับปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานเทียบกับพื้นที่ชิ้นงาน..... 46
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะลูมินา ร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 กับค่าความแข็งของชิ้นงาน (HB)..... 48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมทางด้านยานยนต์ อุตสาหกรรมทางด้านอากาศยาน และอุตสาหกรรมทางการผลิตชิ้นส่วนของโครงสร้าง ที่ได้มีความต้องการที่จะพัฒนาวัสดุทางวิศวกรรมโดยต้องมีศักยภาพในการใช้งานให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุทางวิศวกรรมที่อุตสาหกรรมเหล่านี้ต้องการนั้นต้องมีความสามารถในการรับภาระแรงกระทำได้สูง รวมถึงมีความคงทนต่อสภาวะการใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น ความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี และต้องมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีได้ดีด้วย วัสดุเชิงประกอบ (Composite) เป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถตอบสนองต่อความต้องการเหล่านี้ได้ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบที่เป็นวัสดุที่มีการนำสมบัติที่ดี หรือลักษณะเด่นของวัสดุแต่ละชนิดซึ่งมารวมกัน ซึ่งวัสดุชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุหลัก หรือเนื้อพื้น (Matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่ง หรือหลายชนิดที่ทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งจะมีการกระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหลัก

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนาวัสดุเชิงประกอบอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ ได้มีการนำวัสดุเชิงประกอบมาใช้ผลิตแทนชิ้นส่วนเดิมที่เคยใช้ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติคงทนต่อสภาวะการใช้งานสูง อีกทั้งวัสดุเชิงประกอบนั้น ได้มีการแข่งขันในด้านการตลาดสูง จึงมีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานให้สูงขึ้น วัสดุเชิงประกอบประเภทเนื้อพื้นที่เป็นโลหะสามารถเลือกโลหะที่ทำเป็นเนื้อพื้นได้อย่างหลากหลาย เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ไททาเนียม เป็นต้น โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการผลิต และมีการใช้งานกันอย่างมากเนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกรรมวิธีที่หลากหลาย และมีน้ำหนักเบา มีความเหนียว ความหนาแน่นน้อย และความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุหลักในวัสดุเชิงประกอบ ส่วนอะลูมินา (Al_2O_3) มีสมบัติที่โดดเด่นทางด้านความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) มีจุดหลอมเหลวสูง และมีความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีได้ดี เหมาะสำหรับการนำมาใช้ที่เป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

โครงการนี้ได้มีความสนใจในการผลิตวัสดุเชิงประกอบโดยเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อยแม็ก/อะลูมินา ด้วยกรรมวิธีการถลุง และหล่อที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส ที่มีปริมาณของอะลูมินาร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีคุณภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

- 1.2.1 เพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม/อะลูมินา ด้วยกระบวนการกวนหล่อ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ต่างกัน

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

- 1.3.1 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ โลหะผสมอะลูมิเนียม/อะลูมินา
- 1.3.2 โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ต่างกัน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ต่างกัน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 วิธีการหล่อที่ใช้ในการทดลองเป็นกระบวนการกวนหล่อโดยใช้ความเร็วในการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 วินาที แล้วเทลงแบบหล่อถาวร
- 1.5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อแม่กรถยนต์
- 1.5.3 ใช้แบบหล่อถาวร (Permanent Mold) ที่ทำจากเหล็กกล้าโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาวของชิ้นงาน 150 มิลลิเมตร
- 1.5.4 ใช้อะลูมินา (Al_2O_3) ที่ขนาด 1 ไมโครเมตร โดยใช้ปริมาณร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม
- 1.5.5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลว 690 องศาเซลเซียส
- 1.5.6 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- 1.5.7 วัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tests)

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

กรกฎาคม 2555 – กุมภาพันธ์ 2556

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมี หรือโครงสร้างที่มีความแตกต่างกันตั้งแต่ 2 วัสดุหลักขึ้นไปที่นำมาผสมกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุเชิงประกอบจะประกอบไปด้วยวัสดุตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) และอีกวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรงซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นหรือเรียกว่าส่วนเสริมแรง (Reinforcement) อาจจะมีได้มากกว่า 1 ชนิดขึ้นไปซึ่งจะต้องไม่เป็นตัวทำลายซึ่งกันและกัน

2.1.1 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

2.1.1.1 วัสดุเนื้อพื้น (Matrix)

วัสดุเนื้อพื้น หรือเรียกว่า Primary Phase ที่เป็นเฟสของเนื้อพื้นวัสดุที่มีความต่อเนื่องกัน มีสมบัติความเหนียว เพราะเนื้อพื้นจะต้องเป็นตัวที่ยึดส่วนของส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน เนื้อพื้นที่ดีควรจะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าส่วนเสริมแรง เพื่อลดปัญหาการถ่ายเทแรงระหว่างเนื้อพื้นกับส่วนเสริมแรงที่กระจายตัวในเนื้อพื้น เนื้อพื้นจะทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนเสริมแรงไว้ และมีการถ่ายโอนแรง โดยเนื้อพื้นจะเป็นตัวกลางในการรับภาระแรงกระทำจากภายนอก และเนื้อพื้นจะทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงกับการถูกทำลาย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดจากส่วนเสริมแรงทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม และเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารต่างๆ ที่ถูกเติมเข้าไปในระหว่างกระบวนการผลิต (สุภาสินี, 2555)

ประเภทของวัสดุเชิงประกอบแบ่งตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้น ดังนี้

ก. Polymer Matrix Composites (PMCs)

PMCs เป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้น ส่วนวัสดุที่จะทำหน้าที่เสริมแรงนั้นเป็นได้หลากหลาย วัสดุเชิงประกอบประเภทนี้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีราคาถูก และสามารถขึ้นรูปง่ายที่อุณหภูมิห้องได้

ข. Metal Matrix Composites (MMCs)

MMCs เป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีโลหะ หรือโลหะผสมเป็นเนื้อพื้น ส่วนวัสดุที่ทำหน้าที่เสริมแรงนั้นสามารถเป็นได้ทั้งอนุภาค หรือเส้นใยทั้งที่เป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ข้อดีของ MMCs ที่เหนือกว่า PMCs คือสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงได้ดี ไม่ติดไฟ แต่ว่ามีราคาแพง ดังนั้นมักจะถูกนำไปใช้ในงานเฉพาะที่ต้องการนำสมบัติเด่น เช่น ทางด้านความแข็งแรงเฉพาะ ความแข็งตึงเฉพาะ ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานความคืบ การนำความร้อน เป็นต้น ตัวอย่างการใช้งาน MMCs เช่น การที่ใช้อะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เพื่อที่จะนำไปทำชิ้นส่วนของยานยนต์

ค. Ceramic Matrix Composites (CMCs)

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเซรามิกสามารถทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่ข้อด้อยของเซรามิกนั้น คือมีค่าความทนทานต่อการแตกหักต่ำเมื่อเทียบกับโลหะ ดังนั้นมีการปรับปรุงสมบัติให้ดียิ่งขึ้นจึงมีการนำเซรามิกมาทำเป็น CMCs ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบของอนุภาค วิสเกอร์ หรือไฟเบอร์

2.1.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

ส่วนเสริมแรง หรือเรียกว่า Secondary Phase เป็นเฟสที่มีปริมาณน้อยกว่าวัสดุเนื้อพื้น แต่หลักๆ แล้วส่วนเสริมแรงต้องเป็นวัสดุที่ไม่มีความต่อเนื่อง (Discontinuous) และเป็นเฟสที่จะฝังตัวอยู่ในวัสดุเนื้อพื้น ทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง คือรับความเค้นหลัก หรือรับแรงหลักของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการเสริมแรง (สุภาสินี, 2555) คือ

2.1.2 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle Reinforced Composite)

วัสดุเชิงประกอบ ที่มีส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาค คือวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆ กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นเพื่อจะทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรงนี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบ ที่มีส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือวัสดุเชิงประกอบที่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Particle Strengthened Composite) และวัสดุเชิงประกอบที่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (Dispersion Strengthened Composite) (สุภาสินี, 2555)

2.1.2.1 วัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่

คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในที่นี้ คือจะเป็นการมองในภาพรวมของอนุภาคไม่ใช่เป็นการมองที่ในระดับอะตอม หรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพขนาดของอนุภาคไม่ควรจะมีขนาดใหญ่จนเกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้น อาจมีรูปร่างของอนุภาคเป็นได้หลายแบบแต่ควรจะมีลักษณะที่สมมาตรกัน คือควรจะมีขนาดเท่ากันในทุกๆ ทิศทาง นอกจากนี้ยังมีปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนั้นดีขึ้น

2.1.2.2 วัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก

ในวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคประเภทนี้ อนุภาคที่กระจายตัวที่ดีจะมีขนาดเล็กกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่มาก โดยทั่วไปแล้วอาจจะใช้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตร และอาจจะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค และเนื้อพื้น (Particle Matrix Interaction) ที่จะเป็นตัวช่วยของการเพิ่มความแข็งแรงในระดับ

อะตอม หรือโมเลกุล กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงนี้จะคล้ายกับกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening)

2.1.3 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced Composite)

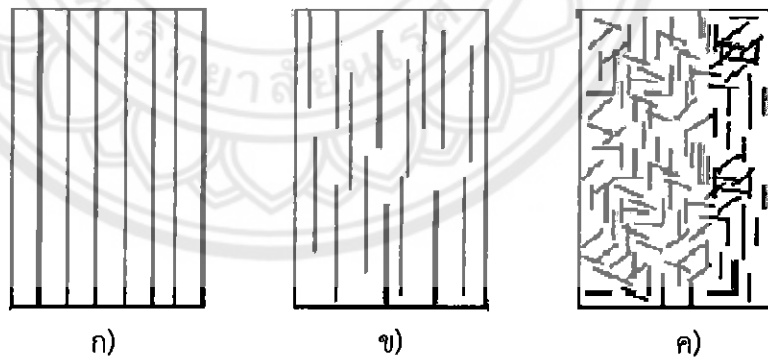
วัสดุที่ใช้เป็นเส้นใยมีหลายรูปแบบ (สุภาสินี, 2555) ดังนี้

2.1.3.1 วิสเกอร์ (Whisker) เป็นเส้นใยผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูง และมีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้ว วิสเกอร์มีราคาแพง เตรียมได้ยาก ตัวอย่างเช่น อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ แกรไฟต์ เป็นต้น

2.1.3.2 ไฟเบอร์ (Fiber) เป็นเส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะแบบพหุผลึก หรือแบบอสัณฐาน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปอาจใช้วัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ และเซรามิก ตัวอย่าง เช่น อะรามิด (aramid) แก้ว คาร์บอน โบรอนออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น

2.1.3.3 ลวดเล็ก (Fine wire) โดยทั่วไปลวดเล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์ และไฟเบอร์ มักจะหมายถึงโลหะ ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้า ไนลิตินัม และทังสเตน ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้เสริมแรงในยางรถยนต์ เป็นต้น

เราสามารถแบ่งประเภทของเส้นใยตามความยาวได้เป็น 2 ประเภท คือเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber) เมื่อนำเส้นใยไปผสมกับเนื้อพื้นที่เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบ จะสามารถจัดเรียงตัวได้ 3 แบบด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเนื้อพื้นแบบต่างๆ

ก) เส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน

ข) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่ขนานกัน

ค) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ

ที่มา : www.physics.kku.ac.th

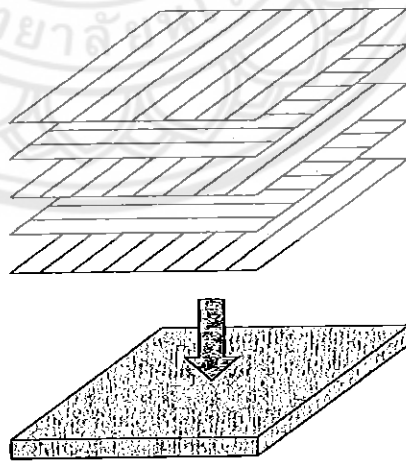
รูปที่ 2.1 ก) คือวัสดุเชิงประกอบประเภทที่มีเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน คือเส้นใยที่มีความยาวได้ตลอดช่วงความยาวของวัสดุเชิงประกอบและจัดเรียงตัวขนานกัน ซึ่งจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยที่ดี รูปที่ 2.1 ข) คือกรณีที่มีเส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวแบบขนานกัน คือเส้นใยไม่ยาวตลอดช่วงความยาวของวัสดุเชิงประกอบ แต่ว่าการจัดเรียงตัวขนานกัน และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยไม่ดีเท่าในรูปที่ 2.1 ก) รูปที่ 2.1 ค) คือที่มีเส้นใยไม่ต่อเนื่อง และมีการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ กรณีนี้จะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงจะต่ำที่สุด 3 ประเภทที่กล่าวมา

2.1.4 วัสดุเชิงประกอบโครงสร้าง (Structural Composite)

วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียว หรือวัสดุเชิงประกอบได้ และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว อาจยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน เราจะสามารถแบ่งวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างนี้ได้เป็น 2 ประเภท คือวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน (Laminar Composite) และวัสดุแผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwic Panel) (สุภาสินี, 2555)

2.1.4.1 วัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน

วัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อนประกอบด้วยแผ่น (Sheet) ที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทางเดียวกันมาจัดเรียงซ้อนกัน ยกตัวอย่างเช่น แผ่นวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวขนานกัน แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนได้เป็นวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อนกันเพื่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงควรเรียงแผ่นแบบสลับกับทิศทางของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.2

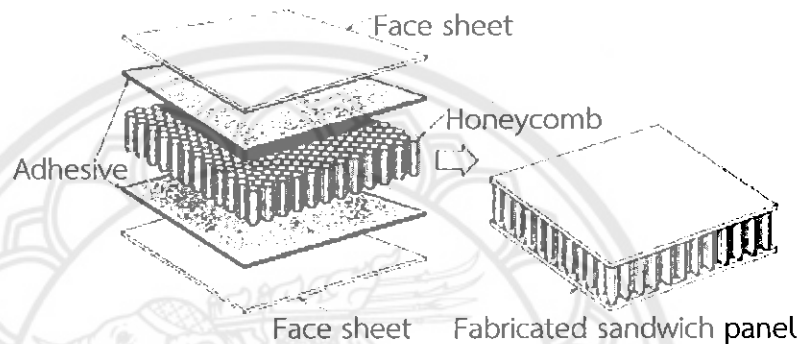


รูปที่ 2.2 วัสดุเชิงประกอบแบบชั้น

ที่มา : Callister (2003)

2.1.4.2 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช

ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชเป็นวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างประเภทหนึ่ง ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นแกนกลาง หรือที่เรียกว่า Core และประกบที่ด้านบนและล่างด้วยแผ่นที่เป็นผิวนอก หรือที่เรียกว่า Face โดยมีแผ่นกาว (Adhesive) ทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่น Core และ Face ที่อยู่ติดกัน หน้าที่ของแผ่น Face คือเป็นตัวรองรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง ส่วน Core จะช่วยเพิ่มค่า Shear rigidity ในระนาบตั้งฉากกับแผ่น Face แล้วมักจะเป็นโครงสร้างที่โปร่ง หรือมีรูพรุนที่แบบโครงสร้างของ Core ที่นิยมใช้ คือแบบรังผึ้ง (Honeycomb) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช

ที่มา : Callister (2003)

2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม และโลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium and Aluminium Alloys) อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่รู้จักกันแพร่หลาย เพราะว่ามีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นประมาณ 1/3 ของเหล็กกล้าหรือทองแดงผสม แต่โลหะผสมอะลูมิเนียมจะมีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักดีกว่าเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูง (High Strength Steels) เหตุนี้เองจึงนิยมใช้ทำโครงสร้างของเครื่องบิน ชิ้นส่วนยานยนต์ และเครื่องจักรต่างๆ

สมบัติที่สำคัญของอะลูมิเนียม และโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้นมีหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวสูง สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย มีอุณหภูมิหลอมเหลวละลายต่ำทำให้ง่ายต่อการหล่อ การนำไฟฟ้าคิดเป็นประมาณร้อยละ 62 ของทองแดง แต่เนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ทำสายส่งไฟฟ้าแรงสูง มีสมบัติการนำความร้อนสูง และไม่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์ จึงนิยมนำไปใช้ทำภาชนะหุงต้มของอาหาร มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีการนำมาใช้งานโดยทั่วไปได้ดี (ณรงค์ฤทธิ์, 2555)

2.2.1 การจำแนกประเภทของโลหะอะลูมิเนียมผสม

โลหะผสมอะลูมิเนียมนี้สามารถผสมกับโลหะอื่นๆ ได้หลายชนิด เช่น ทองแดง ซิลิคอน แมกนีเซียม สังกะสี ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทนี้มีสมบัติที่แตกต่างกันไป และสามารถเลือกใช้ใช้งานได้ อย่างกว้างขวาง โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

2.2.1.1 โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought)

เป็นโลหะผสมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยการรีด หรืออัดขึ้นรูปออกมาได้ เป็นแบบแผ่น หรือเป็นแบบแท่ง ซึ่งมีทั้งประเภทที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ ส่วนใหญ่โลหะที่นำมาผสมกับอะลูมิเนียม คือทองแดง ซิลิคอน และแมกนีเซียม

2.2.1.2 โลหะผสมประเภทหล่อ (Castable)

เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติพิเศษ มีความสามารถในการไหลที่ดี ช่วยในการหล่อ ขึ้นรูปได้ง่าย ส่วนใหญ่โลหะชนิดนี้สามารถอบชุบแข็งตัวด้วยความร้อนได้ โลหะผสมที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิคอน

2.2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียมสำหรับงานหล่อ

โลหะผสมอะลูมิเนียมสำหรับงานหล่อเป็นโลหะผสมที่พัฒนามาจากระบบยูเทกติกของ 2 ธาตุ เช่น อะลูมิเนียมผสมซิลิคอน (Al-Si), อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-Cu) และอะลูมิเนียมผสม แมกนีเซียม (Al-Mg) ส่วนใหญ่โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้งานจะพัฒนามาจาก อะลูมิเนียมผสมซิลิคอน โดยมีการเติมธาตุแมกนีเซียม (Mg) และ/หรือทองแดง (Cu) ที่เพิ่มเข้าป็นั้นทำให้โลหะผสมเหล่านี้ สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยกระบวนการตกตะกอน เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงโดยการ เติมธาตุผสมบางอย่าง เช่น Ni, Cr และ Mn ทั้งยังช่วยให้โลหะผสมแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง และยังคงช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการใช้งาน ที่อุณหภูมิสูงด้วย

ชนิดของโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ใช้สำหรับงานหล่อ (Aluminium Alloy Type) ที่ใช้ทั่วไปมี 3 แบบหลักๆ ได้แก่ (ณรงค์ฤทธิ์, 2555)

2.2.2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียมไฮโปยูเทกติก

โลหะไฮโปยูเทกติก 2 ธาตุของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ซึ่งไม่เป็นที่นิยม ใช้กันมากนัก เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านสมบัติทางกล ดังนั้นโลหะผสมระบบนี้ จึงมีการเติมทองแดง และ/หรือ แมกนีเซียม (เช่น LM4, 16, 25, 27) ลงไปเพื่อสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธี การตกตะกอน (Precipitation hardening) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมชนิดนี้ ตัวอย่าง เช่น Al-5%Si ประกอบด้วยเดนไดรต์ของอะลูมิเนียม และเฟสยูเทกติกซิลิคอนที่แยกตัวออก มาอยู่ระหว่าง

เดนไดรต์ จะเห็นโพรงหดตัว (Shrinkage pore) กระจายอยู่บ้าง เนื่องจากโลหะผสมไฮโปยูเทคติก ช่วงการแข็งตัวที่กว้าง (Wide freezing range)

2.2.2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียมยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียมยูเทคติก เป็นโลหะผสมชนิดที่ไม่สามารถจะปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนได้ เช่น LM6 และ LM20 แต่สามารถผสมธาตุทองแดง และ/หรือแมกนีเซียม หรืออื่นๆ เพื่อให้สามารถเกิดการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็ง เช่น LM9 และ LM13 อะลูมิเนียมผสมพวกนี้จะไหลตัวในสภาพของเหลวได้ดีมาก สามารถผลิตได้หลายแบบ ทั้งการหล่อในแบบหล่อทราย และหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวร ส่วน LM6 และ LM20 มักจะใช้ในแบบหล่อถาวรมากกว่า LM2 และ LM24 เมื่อต้องการความคงทนต่อการกัดกร่อน โลหะซึ่งมีธาตุผสมของทองแดงต่ำ เช่น อะลูมิเนียมเกรด LM6 และ LM20 จะทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า ทำให้เหมาะกับการที่จะใช้ทำเป็นชิ้นงานสำหรับเรือเดินทะเล ข้อต่อของยานพาหนะ ปลอกกันน้ำ (Water jacket) โคมไฟตามถนน เป็นต้น

2.2.2.3 อะลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทคติก

อะลูมิเนียมผสมชนิดไฮเปอร์ยูเทคติก (Hyper eutectic alloys) ที่ใช้งานในสภาวะที่ต้องการการขยายตัวจากความร้อนต่ำ และในขณะเดียวกันทนการเสียดสีได้ดี เช่น ลูกสูบ เสือสูบ เป็นต้น

2.2.3 มาตรฐานของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

มาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับการแบ่ง ชนิดของอะลูมิเนียมสำหรับที่ใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะในประเทศไทย คือมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (AA) และประเทศญี่ปุ่น (JIS) อะลูมิเนียมเกรดที่นิยมใช้งาน และส่วนผสมทางเคมีสรุปไว้ในตารางที่ 2.1 (เขาวลิต, 2551)

เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียมและซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พบว่าการที่มีซิลิคอนละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมทำให้มีจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมอยู่ต่ำสุด ที่จุดการเกิดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) มีส่วนผสมซิลิคอนประมาณร้อยละ 11.6 ที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 577 องศาเซลเซียส โดยเรียกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีส่วนผสมทางเคมีที่จุดปฏิกิริยายูเทคติกนี้ว่าอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดยูเทคติก แต่ถ้าหากว่าอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีปริมาณซิลิคอนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 11.6 จะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) และถ้าอยู่ในกรณีที่มีปริมาณของซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.6 จึงจะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic)

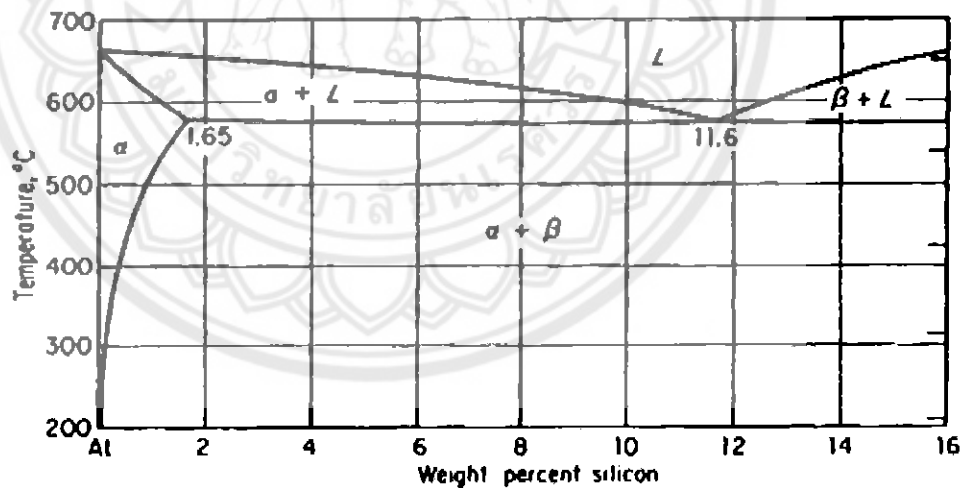
นอกจากมีซิลิคอนซึ่งเป็นธาตุผสมหลักในอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้ ยังมีธาตุอื่นๆ ที่ผสมลงไปเป็นสารประกอบเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่น แมกนีเซียม ทองแดง และนิกเกิล ในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะช่วยทำให้สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นอกจากนั้นแล้วการมีทองแดงผสมในกรณีอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติกยังช่วยเพิ่มความ

แข็งแรง ความสามารถในการกลึงตัด และการนำความร้อน แต่จะมีการที่สูญเสียความเหนียวและการต้านทานการกัดกร่อนไป

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมการหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณ)

มาตรฐาน AA	มาตรฐาน JIS	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn
A319.1	AC2A	5.0-7.0	3.0-5.0	0.55	0.90	2.0	0.20-0.65
A332.2	AC8A	10.5-13.5	0.8-1.5	0.9-1.5	0.60	0.35	0.35
A356.0	AC4C	6.5-7.5	0.02	0.30-0.45	0.15	0.07	0.10
380.2	ADC10	8.0-11.0	2.0-4.0	0.15-0.55	0.6-0.11	1.20	0.55
A360.2	AC4A	9.0-11.0	0.03	0.25-0.45	0.40	0.10	0.45
333.1	AC4B	7.5-9.5	2.0-3.5	0.15-0.65	0.7	1.2	0.15-0.56
413.2	AC3A	10.5-13.5	0.03		0.40	0.10	0.35
-	ADC12	10.5-12.0	1.5-3.5		1.3	1.0	0.5

หมายเหตุ: กลุ่ม 3XX.X โดยประกอบด้วย Al-Si-(Cu/Mg) และกลุ่ม 4XX.X ที่ประกอบด้วย Al-Si
ที่มา : เซาวลิต (2551)



รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

ที่มา : เซาวลิต (2551)

เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.4 พบว่าที่ส่วนผสมของซิลิคอนประมาณร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิประมาณ 577 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมผสมจะมีจุดหลอมเหลวต่ำสุด ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) โดยเรียกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีส่วนผสมทางเคมี ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก นี้ว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดยูเทคติก แต่หากอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีปริมาณของซิลิคอนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะ

เรียกว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) และในกรณีที่มีซิลิคอนอยู่มาก กว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่า อะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ทั้งนี้อะลูมิเนียม-ซิลิคอนแต่ละเกรดมีความต้องการเทคนิคสำหรับปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นยังมีการเติมธาตุอื่นๆ ที่ผสมลงไปประกอบ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่น มีการเติมแมกนีเซียม ทองแดง และนิกเกิล โดยเมื่อเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะช่วยทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นอกจากนั้นแล้วการมีทองแดงผสมอยู่ในกรณีอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติกจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการกลึง ตัด และการนำความร้อน แต่โลหะผสมนี้จะสูญเสียความเหนียวและความต้านทานการกัดกร่อน (เซวาลิต, 2551)

2.3 อะลูมินา (Alumina, Al_2O_3)

อะลูมินา (Al_2O_3) เป็นวัสดุหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก มีมูลค่าสูงเนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน เช่น มีจุดหลอมเหลวที่สูง และมีความแข็งสูง สมบัติของอะลูมินาแสดงในตารางที่ 2.2 อะลูมินาเป็นสารที่มีความเฉื่อยมาก และทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่างต่างๆ ได้ดี

ตารางที่ 2.2 สมบัติของอะลูมินา

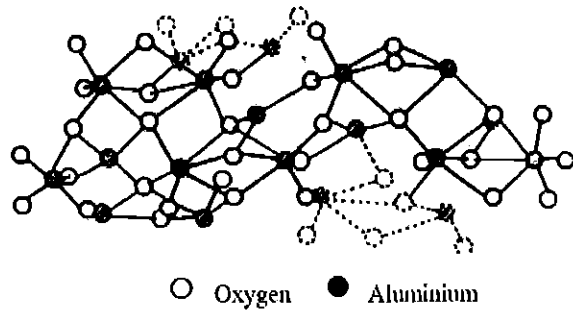
Properties	$\alpha-Al_2O_3$
Density, g/cm^3	3.96
Melting temperature, $^{\circ}C$	2054
Elastic modulus, GPa	520
Coefficient of thermal expansion (25-1000 $^{\circ}C$), $10^{-6}/K$	8.5
Indentation hardness, GPa	20

ที่มา : Nicholas P. Cheremisinoff (1990)

ผลึกของอะลูมินานั้นมีด้วยกัน 2 รูปแบบ (จิตติ, 2551) คืออะลูมินาที่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว (Single crystal) ซึ่งเป็นอะลูมินาที่มีมูลค่าสูง เนื่องจากถูกนำไปใช้เป็นเครื่องประดับ และอะลูมินาที่อยู่ในรูปของโครงสร้างพหุผลึก (Polycrystalline) นั้นมีราคาที่ย่อมเยากว่า แต่เป็นวัสดุที่พบว่ามีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูง อะลูมินาถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ อย่างหลากหลาย เช่น ผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่ใช้ทำลูกบิดและผนังกรูหม้อบด เครื่องมือตัดแต่งวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ในงานด้านไฟฟ้า วัสดุยานยนต์ วัสดุทนไฟ ชิ้นส่วน ลดอันตรายจากกระสุน ตลอดจนชิ้นส่วนของอวัยวะทดแทนในทางการแพทย์ เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น

อะลูมินาที่มีความเสถียรมากที่สุดจะอยู่ในรูปของอัลฟาอะลูมินา ($\alpha-Al_2O_3$) ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซาโกนอล (Hexagonal) โดยจะมีออกซิเจนเรียงตัวกันแบบเฮกซาโกนอล และยังมี

อะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่ในช่องออกตะยี่ตรอล 2 ใน 3 ส่วนของช่องทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2.5



○ Oxygen ● Aluminium

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอัลฟาอะลูมินา
ที่มา : W.E. Worrall (1986)

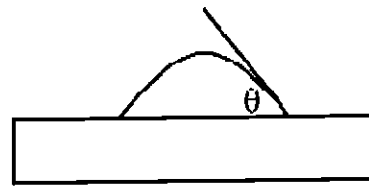
2.4 การเปียกผิว (Wettability)

สมบัติโดยทั่วไปของอะลูมินาจะขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปน (Impurity) ที่มากับอะลูมินา ส่วนใหญ่แล้วสิ่งเจือปนที่ผสมมากับอะลูมินา ได้แก่ ซิลิกา (SiO₂) แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) และโพแทสเซียม (Potassium) สิ่งเจือปนเหล่านี้ มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าอะลูมินา และจะมีสถานะเป็นของเหลว ระหว่างกระบวนการเผาผนึก (Sintering) ของเหลวเหล่านี้จะส่งผลให้วัสดุมีความหนาแน่นที่สูงขึ้น แต่จะส่งผลให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงและความทนทานต่อการคืบ (Creep-resistance) ของวัสดุลดลง

จากการศึกษาสมบัติการเปียก และมุมสัมผัสระหว่างของเหลว และของแข็ง พบว่าของเหลวสามารถเปียกบนผิวของแข็งได้หลายลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ก) แสดงถึงสมบัติการเปียกที่ดี (Good wetting) ซึ่งมุมสัมผัสน้อยกว่า 90° (θ < 90°) ส่วนในรูปที่ 2.6 ข) แสดงถึงสมบัติการเปียกที่ไม่ดี (Poor wetting) ซึ่งมุมสัมผัสจะมากกว่า 90° (θ > 90°) สำหรับรูปที่ 2.6 ค) แสดงถึงสมบัติการเปียกที่ดีมาก (Complete wetting) ทำให้วัสดุทั้ง 2 ชนิดนั้นยึดประสานกันแน่น ซึ่งมุมสัมผัสจะมีค่าเท่ากับ 0° (θ = 0°) สำหรับรูปที่ 2.6 ง) แสดงถึงพลังงานที่ผิว และมุมสัมผัสของวัสดุ ซึ่งมุมสัมผัสจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่ผิวของของแข็ง ของเหลว และแก๊สในสภาวะสมดุล โดยพลังงานที่ผิวของทั้ง 3 สถานะของวัสดุจะสมดุลกัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

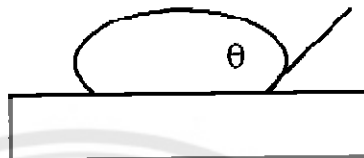
$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \tag{2.1}$$

- โดย γ_{sv} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็ง และแก๊ส (MJ/m²)
- γ_{sl} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็ง และของเหลว (MJ/m²)
- γ_{lv} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของเหลว และแก๊ส (MJ/m²)
- θ คือ มุมสัมผัส (°)



$\theta < 90^\circ$ Good wetting

ก)



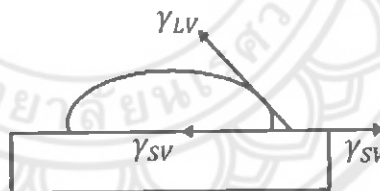
$\theta > 90^\circ$ Poor wetting

ข)



$\theta = 0^\circ$ Complete

ค)



Interfacial tensions

ง)

รูปที่ 2.6 สมบัติการเปียกผิว และมุมสัมผัสระหว่างของเหลว และของแข็ง

ก) การเปียกที่ดีระหว่างของแข็ง และของเหลว

ข) การเปียกที่ไม่ดีระหว่างของแข็ง และของเหลว

ค) การเปียกที่ดีมากระหว่างของแข็ง และของเหลว

ง) พลังงานที่ผิว และมุมสัมผัสของวัสดุทั้ง 3 สถานะ

ที่มา : สุธรรม ศรีหล่มสัก (2542)

ตารางที่ 2.3 มุมสัมผัส และพลังงานที่ผิวหน้าร่วมระหว่างวัสดุเซรามิก และวัสดุโลหะที่ได้จากการคำนวณ การทดลอง

System	T(K)	θ degree		Interfacial energy (MJ/m ²)
		Calculated	Experimental	
Al ₂ O ₃ - Al	1500	98	60	840
Al ₂ O ₃ - Fe	1823	150	141	1780
Al ₂ O ₃ - Ni	1773	136	129	10,000
Al ₂ O ₃ - Ti	1950	129	-	1150
Al ₂ O ₃ - Cr	2173	145	65	1590
Al ₂ O ₃ - Nb	2325	116	40	571
Al ₂ O ₃ - Mo	2325	105	25	574
Al ₂ O ₃ - W	2323	112	20	574
ZrO ₂ - Fe	1823	147	111	1780
ZrO ₂ - Ni	1823	134	130	1000

ที่มา : Upadhyaya (1998)

จากตารางที่ 2.3 แสดงถึงมุมสัมผัส และพลังงานที่ผิวหน้ารอยต่อระหว่างวัสดุเซรามิก และวัสดุโลหะที่ได้จากการคำนวณ การทดลอง จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้อะลูมินาเซรามิก และนิกเกิล (Al₂O₃-Ni) มีค่าพลังงานที่ผิวหน้ารอยต่อสูงถึง 10,000 เมกกะจูลต่อตารางเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวหน้ารอยต่อของวัสดุทั้ง 2 ชนิด มีพันธะที่ผิวสัมผัสแข็งแรงมาก ในทางตรงกันข้ามระบบที่ใช้อะลูมินาเซรามิก และไนโอเบียม (Al₂O₃-Nb) จะให้ค่าพลังงานที่ผิวหน้ารอยต่อค่อนข้างต่ำอยู่ประมาณ 571 เมกกะจูลต่อตารางเมตร แสดงว่าที่ผิวหน้ารอยต่อของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้มีพันธะค่อนข้างหลวมไม่แข็งแรง

2.5 กลไกการเพิ่มความแข็งแรง (Strengthening Mechanisms)

กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะจะถูกควบคุมโดยจำนวนของดิสโลเคชัน (Dislocation) และความสามารถในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน โลหะจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันถูกขัดขวาง โดยกลไกการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะประกอบไปด้วย (พรวสา, 2551)

2.5.1 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยเกรนขนาดเล็ก (Refining the Grain Size)

กระบวนการนี้เกิดขึ้นโดยอาศัยขอบเกรน (Grain Boundary) หรือขอบเกรนย่อย (Subgrain Boundary) ขอบเกรนช่วยทำให้โลหะ และโลหะผสมมีความแข็งแรงขึ้นโดยจะทำหน้าที่เป็นกำแพงกันไม่ให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ ยกเว้นเมื่ออุณหภูมิสูงๆ ทำให้กลายเป็นบริเวณที่อ่อนแอ โดยทั่วไปโลหะที่มีขนาดของเกรนละเอียดจะแข็งแรงกว่า เหนียวกว่า และไวต่อการทำให้แข็งด้วย

ความเครียด (Strain hardening) วัสดุเมื่อมีขนาดของเกรนละเอียดจะทำให้เนื้อมีความสม่ำเสมอและมีสมบัติที่เหมือนกันตลอด (แม้น, สมชัย และธรรมบุญ, 2551)

2.5.2 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening)

การเพิ่มสารละลายของแข็ง เพิ่มธาตุชนิดหนึ่งหรือหลายธาตุเข้าไปผสม เพื่อทำให้เกิด Solid Solution โครงสร้างของ สารละลายของแข็งแบบแทนที่ (Substitutional) และสารละลายของแข็งแบบแทรกที่ (Interstitial Solid Solution) เมื่อเอาอะตอมของธาตุที่ใส่เข้าไปผสม Substitutional (solute) atoms ในของผสมที่เป็นของแข็ง (Solvent) ความเค้นก็จะเกิดขึ้นรอบๆ ของแต่ละอะตอมที่เติม สนามความเค้นเหล่านี้จะเกิดอันตรกิริยากับดิสโลเคชัน และทำให้การเคลื่อนที่ของอะตอมเป็นไปด้วยความยากลำบาก ดังนั้นโลหะที่มี Solid Solutions จะมีความแข็งแรงกว่าโลหะบริสุทธิ์ (แม้น, สมชัย และธรรมบุญ, 2551)

ปัจจัยสำคัญที่ Solid Solution ช่วยทำให้โลหะมีความแข็งแรงขึ้น คือ

2.5.2.1 ปัจจัยของขนาดสัมพัทธ์ (Relative size factor) ความแตกต่างในขนาดของอะตอมของตัวถูกทำละลาย (Solute) และตัวทำละลาย (Solvent) มีผลต่อปริมาณ Solid Solution ที่จะทำให้โลหะแข็งแรงขึ้น เพราะว่โครงผลึก (Lattice) เกิดการบิดเบี้ยว การบิดเบี้ยวของโครงผลึกทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ลำบากมากขึ้น และทำให้โลหะที่เป็น Solid Solution ของโลหะแข็งแรงขึ้น

2.5.2.2 Short range order Solid Solution ในลักษณะที่เป็นการผสมกันของอะตอมเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้น้อยอาจเป็นการบังเอิญ และเป็นชนิดของ Short range order หรือเป็นการรวมตัวคล้ายเกิดอะตอมขึ้น เป็นผลให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากโดยโครงสร้างของพันธะต่างกัน

2.5.3 การเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียด หรือการรีดเย็น (Strain Hardening)

Cold Strain หรือ Working Hardening วิธีนี้เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ หรือโลหะผสมบางชนิด ที่ไม่สามารถอบชุบได้ด้วยความร้อน (Heat Treatment) ในกระบวนการรีดเย็น ทำให้เกรนมีการยืดตัวไปตามแนวแรงกระทำ และมีการจัดเรียงตัวของเกรนใหม่ ทำให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นเกิดจากดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นใหม่เกิดปฏิกิริยากับดิสโลเคชันที่มีอยู่เดิมดิสโลเคชันใหม่เคลื่อนผ่านดิสโลเคชันที่มีอยู่เดิมได้ยากยิ่งขึ้น และเกิด Strain Hardening ความระเกะระกะของดิสโลเคชันทำให้โลหะเกิดความแข็งแรงจากการยืด หรือการแปรรูปจากการเพิ่มปริมาณการขึ้นรูปเย็น โครงสร้างที่ได้จะไม่มีเสถียรภาพ และมีความเหนียวลดลง เพื่อเพิ่มความเหนียวและความมีเสถียรภาพ จึงต้องนำโลหะไปผ่านกระบวนการอบอ่อน (Annealing)

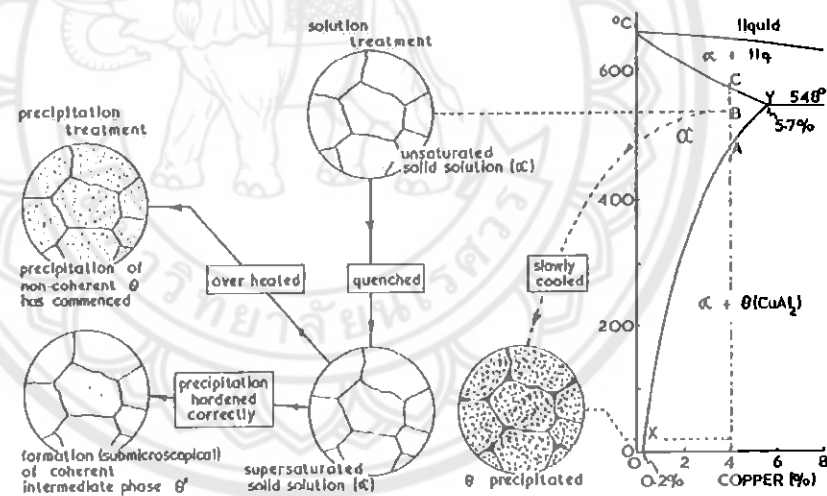
2.5.4 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (Fine Particle Strengthening)

ความแข็งแรงจากอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (Strengthening from Fine Particles) อนุภาคที่กล่าวถึงนี้รวมไปถึง Precipitated Hardening และอนุภาคที่เติมเข้าไปโดยตรง อนุภาคเหล่านี้จะทำอันตรกิริยากับดิสโลเคชัน โดยจะอาศัยกลไกดิสโลเคชันตัดผ่านอนุภาค (A Dislocation-Cutting Particle) หรือกลไกการโอบของดิสโลเคชันรอบๆ อนุภาค (Particle Looping)

2.5.4.1 กลไกดิสโลเคชันตัดผ่านอนุภาค

ตัวอย่างการเพิ่มความแข็งแรงโดยอาศัยกลไกนี้ ที่สำคัญ คือ Precipitated-Hardening หรือ Age Hardening เกิดได้เมื่อเฟสที่สอง (Second Phase) มีความสามารถในการละลาย (Solubility) ได้ที่อุณหภูมิสูง และความสามารถนี้ลดลงที่อุณหภูมิต่ำ ขั้นตอนการเพิ่มความแข็งแรงโดย Precipitated Hardening มี 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

ก. Solution Treatment พิจารณารูปที่ 2.7 เมื่อให้ความร้อนจนถึงจุด A สารละลายของแข็ง β ที่เกินอยู่จะสลายตัวและละลายอยู่ใน α โครงสร้างที่ได้จะเป็นสารละลายของแข็ง α เนื้อเดียว หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) สู่อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้คือสารละลายอิ่มตัวอย่างยวดยิ่ง (Super Saturated α -Solid Solution)



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ที่อัตราการเย็นตัวช้า ๆ ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน และการเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก

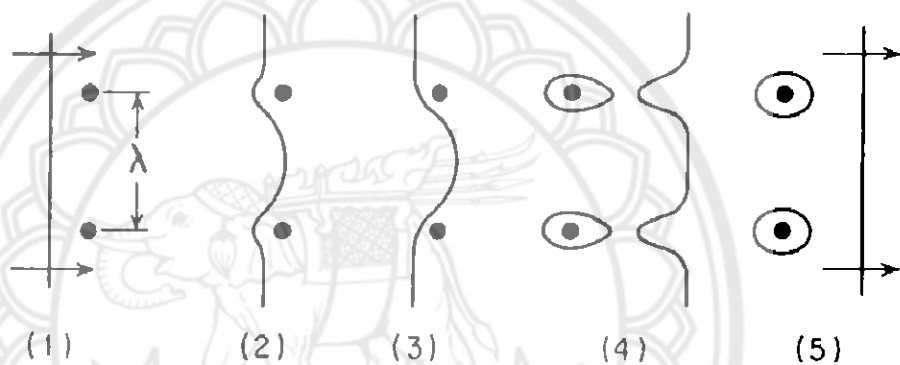
ที่มา : พรวิสา (2551)

ข. Aging Process จากขั้นตอน Solution Treatment จะได้สารละลายของแข็งที่อิ่มตัวอย่างยวดยิ่ง และไม่เสถียร กล่าวคือ สารละลายส่วนเกิน (β phase) พยายามที่จะแยกตัวตกตะกอนออกมา (Precipitate) ในขณะที่ Aging จะเกิด Aging Hardening ขึ้น เนื่องจากเกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึกสาเหตุจากการเกิด Coherency Precipitate ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแดง ซึ่งมีขนาดเล็กมาก และกระจายตัวอย่างทั่วไประยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นผลให้โลหะผสมดังกล่าวมีสมบัติในด้าน

ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น หนึ่งเวลาของการทำ Aging ต้องเลือกให้เหมาะสม เพราะถ้าทำทิ้งไว้นานเกินไปจะเกิดสถานะที่เรียกว่า Over Aging คือความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจะเริ่มลดลง

2.5.4.2 การโอบของดิสโลเคชันรอบๆ อนุภาค (Particle Looping)

รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการโอบรอบอนุภาคของดิสโลเคชัน เกิดขึ้นได้เมื่อแรงเฉือนที่มากกระทำสามารถขยายเส้นดิสโลเคชันให้โค้งออกจนกระทั่งดิสโลเคชันชนกัน และเกิดการหักล้าง (Annihilate) ทำให้เกิดวงของดิสโลเคชันรอบๆ อนุภาค ส่วนดิสโลเคชันที่เหลือก็จะสลับหรือเลื่อนออกไปได้อีก เมื่ออนุภาคที่ตกตะกอนมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะมีการจัดเรียงตัวแบบ Coherent กับ Matrix ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นได้จากการที่อนุภาคตกตะกอนต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันนั่นเอง



รูปที่ 2.8 กลไกการโอบรอบดิสโลเคชัน

ที่มา : พรวสา (2551)

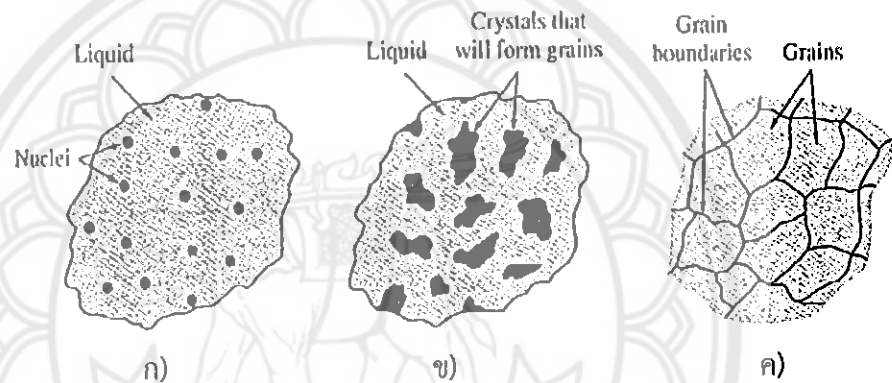
2.5.5 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการเปลี่ยนเฟส (Phase Transformation Strengthening)

กระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นเฟสมาร์เทนไซด์ (Martensite) และอาศัยการแทรกตัวของคาร์บอนในมาร์เทนไซด์

คาร์บอนมีอิทธิพลอย่างมากในการเพิ่มความแข็งแรงของมาร์เทนไซด์ โดยการแทรกของคาร์บอนลงในช่องว่างออกตะฮีดรอล ทำให้เกิดสนามความเครียดในมาร์เทนไซด์ ซึ่งสนามความเครียดนี้จะมีปฏิกิริยายึดหยุ่นกับดิสโลเคชันทำให้ดิสโลเคชันได้มากขึ้น ถึงแม้มาร์เทนไซด์จะฟอร์มตัวอย่างรวดเร็วก็ตาม การตกตะกอนของคาร์บอนยังมีโอกาสเกิดขึ้นได้ภายหลังการฟอร์มตัวของมาร์เทนไซด์ถ้าอุณหภูมิ M_s ไม่ต่ำจนเกินไป Winchell และ Cohen ได้ทดลองเติม Ni ลงในโลหะผสม Fe-C เพื่อลด M_s ให้ต่ำพอที่จะไม่เกิดการตกตะกอนต่อไปได้อีก มาร์เทนไซด์ที่ได้จึงเป็นมาร์เทนไซด์บริสุทธิ์

2.6 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification)

เมื่ออุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวลดต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ระบบจะมีแรงขับ (Driving Force) ที่มากพอจะทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น จนโลหะหลอมเหลวแข็งตัวทั้งปริมาตร โดยอะตอมจะเกิดการสั่นสะเทือนน้อยลง ระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ จนกระทั่งอะตอมดังกล่าวเกิดการจับรวมตัวกันพร้อมเป็นจุดเริ่มต้นของการแข็งตัวที่เรียกว่า นิวคลีไอ (Nuclei) แสดงดังรูปที่ 2.9 ก) จากนั้นอะตอมจะจับรวมตัวกันมากขึ้นกลายเป็นนิวเคลียส (Nucleus) และเมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ จะเกิดการขยายตัวของนิวเคลียสกลายเป็นผลึก (Crystal) แสดงดังรูปที่ 2.9 ข) โดยที่ผลึกจะขยายตัวโตขึ้นในทิศทางอิสระของแต่ละผลึก เมื่อเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบที่แตกต่างกันโตมาบรรจบกัน เป็นผลให้อะตอมบริเวณดังกล่าว มีการจัดเรียงตัวที่ต่างกันด้วยเกิดเป็นแนวรอยต่อที่เรียกว่า ขอบเกรน (Grain Boundary) แสดงดังรูปที่ 2.9 ค) และเรียกพื้นที่ที่ถูกปิดล้อมรอบด้วยเส้นขอบเกรนนี้ว่า เกรน



รูปที่ 2.9 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว

ก) การเกิดนิวคลีไอ

ข) การโตของนิวเคลียสเป็นผลึก

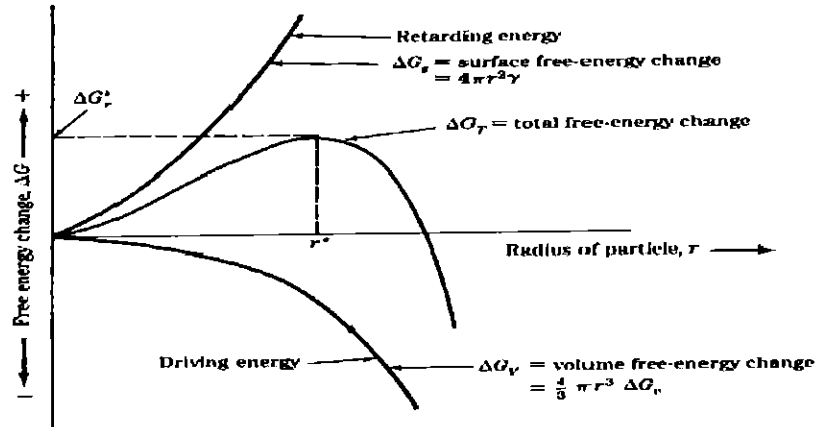
ค) การเชื่อมต่อกันของผลึกเกิดเป็นเกรน และมีเส้นแบ่งขอบเกรน

ที่มา : แม้น, สมชัย และธรรมบุญ (2551)

2.6.1 การกำเนิดนิวเคลียส (Nucleation)

2.6.1.1 กลไกการกำเนิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation)

เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ โดยนิวคลีไอที่เกิดขึ้นจากกลไกนี้จะเกิดจากการเคลื่อนตัวของอะตอมโลหะอย่างช้าๆ และเกิดพันธะระหว่างกันจนได้ขนาดที่มีเสถียรภาพ เรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size) แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถจะโตเป็นผลึกต่อไปได้ ส่วนกลุ่มอะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤตจะไม่มีเสถียรภาพ และละลายกลับไปเป็นโลหะหลอมเหลว แต่ถ้าขนาดของนิวคลีไอขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤต ซึ่งระบบจะมีเสถียรภาพ และพร้อมที่จะเกิดเป็นผลึกต่อไปได้ (พรวสา, 2551)

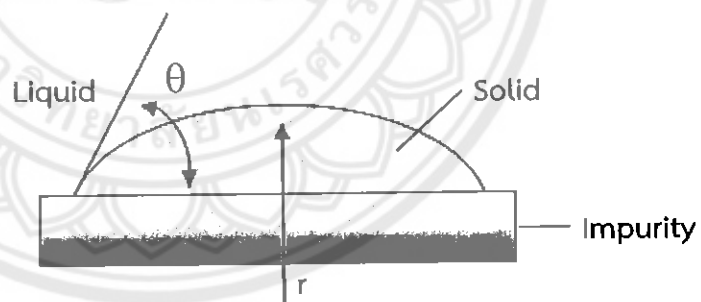


รูปที่ 2.10 พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง ΔG_T เทียบกับรัศมีของนิวเคลียสที่เกิดจากการแข็งตัวของน้ำโลหะ โดยที่รัศมีของอนุภาค $> r^*$ นิวเคลียสจะโตต่อไปได้

ที่มา : http://eng.sut.ac.th/meta/images/stories/pdf/01-Solidification_of_Metal.pdf

2.6.1.2 กลไกการกำเนิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation)

เกิดขึ้นโดยอาศัยสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในโลหะหลอมเหลวทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสซึ่งมักจะเกิดกับโลหะโดยทั่วไปเป็นส่วนใหญ่ และเกิดได้ง่ายกว่ากลไกการกำเนิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ เนื่องจากที่มีพลังงานพื้นผิวในการสร้างนิวเคลียสน้อยกว่า กระบวนการนี้จึงขึ้นอยู่กับมุมสัมผัสระหว่างของแข็งและผิวของสิ่งเจือปน (θ) (พรวสา, 2551) แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

2.6.2 กลไกการเติบโต (Growth Mechanisms)

เมื่อเฟสของนิวเคลียสที่ก่อตัวขึ้นไม่ว่าในเฟสของเหลว หรือของแข็งนิวเคลียสจะโตโดยที่อะตอม ซึ่งเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระภายในของเหลวที่จะถูกดูดเข้ามารวมตัวกับนิวเคลียส ที่มีการก่อตัวนั้นก่อนหน้าตัวแปรสำคัญทำให้เกิดการโตนั้น คือโลหะหลอมเหลวสูญเสียความร้อน ที่มีจากการพิจารณาว่าการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ในการหล่อแบบในแม่พิมพ์นั้นมีความร้อน 2 ชนิด คือที่มีการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม หรือการนำความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์จนกระทั่งโลหะแข็งตัว อุณหภูมิ

ลดลงสู่อุณหภูมิห้อง และชนิดที่ 2 คือความร้อนแฝง (Latent Heat) ของการหลอมละลาย และมีความร้อนที่เกิดขึ้น และสูญเสียไปเมื่อของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง การกำจัดความร้อนแฝงเป็นวิธีการที่สามารถนำมาอธิบายกลไกการโตของของแข็งโดยแบ่งออกได้ ดังนี้ (กิตติพงษ์, 2553)

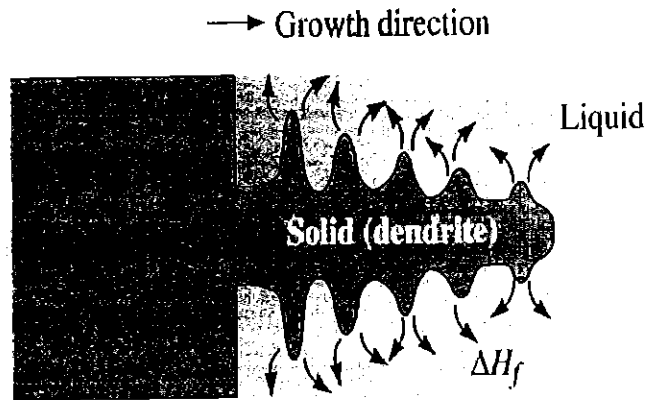
2.6.2.1 การเติบโตแบบระนาบ (Planar Growth)

เมื่อของเหลวที่มีสารก่อนิวเคลียสละลายอยู่เย็นตัวลงภายใต้สภาวะสมดุลนั้น การเกิดนิวเคลียสเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่าน Undercooling ดังนั้นอุณหภูมิของของเหลวหน้าระนาบของการแข็งตัว คือ Interphase กันระหว่างของเหลว และของแข็งจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิการแข็งตัว ความร้อนแฝงที่จะถ่ายเทจากของเหลวผ่าน Interphase ระหว่างของแข็ง และของเหลวเข้าไปในของแข็งทำให้เกิดของแข็งขนาดเล็กเริ่มก่อตัวขึ้น และส่วนที่ยื่นออกมาจาก Interphase อุณหภูมิที่มีค่าสูงกว่าของแข็ง และการถ่ายเทความร้อนแฝงจากของเหลวสู่ของแข็งหรือสู่ผนังแบบหล่อ ทำให้เกิดของแข็งบริเวณ Interphase เพิ่มขึ้น การเติบโตของของแข็งที่ยื่นออกมานั้นจะหยุดลงเมื่อส่วนของ Interphase เต็มเต็มไปด้วยอะตอมของเหลวทั้งหมด หรืออุณหภูมิระหว่างของเหลว และของแข็งมีค่าเท่ากัน กลไกการเติบโตแบบระนาบ Interphase ที่จะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอในแนวระนาบเข้าสู่ของแข็ง (กิตติพงษ์, 2553)

2.6.2.2 การเติบโตแบบเดนไดรต์ (Dendrite Growth)

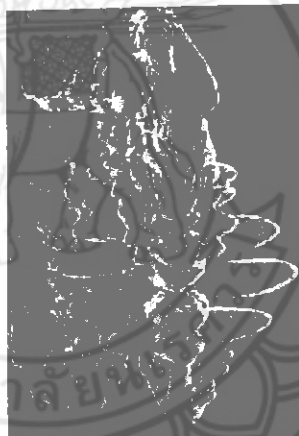
เมื่อของเหลวไม่มีสารก่อนิวเคลียสผสมอยู่ ของเหลวจึงจำเป็นที่จะต้องผ่าน Undercooling เพื่อที่จะทำให้มีของแข็งก่อตัวขึ้น ภายใต้สภาวะนี้ของแข็งขนาดเล็ก จะเริ่มก่อตัวขึ้นจาก Interphase ซึ่งมีลักษณะคล้ายกิ่งไม้ เมื่อของแข็งเดนไดรต์เติบโต ความร้อนแฝงในของแข็งเมื่อหลอมละลายจะถ่ายเทสู่ของเหลวที่ผ่าน Undercooling ทำให้อุณหภูมิของของเหลวนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น กิ่งก้านของเดนไดรต์จะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ และถ่ายเทความร้อนจากของแข็งที่เกิดขึ้นสู่ของเหลวที่ผ่าน Undercooling จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการแข็งตัว ของเหลวที่หลงเหลือจะมีการแข็งตัวแบบระนาบ ความแตกต่างระหว่างการแข็งตัวแบบระนาบ และเดนไดรต์ คือรูปแบบการสูญเสียความร้อนแฝง ผนังแบบหล่อจะดูดซับความร้อนแฝงได้จากการแข็งตัวเป็นระนาบ ขณะที่ของเหลวที่ผ่าน Undercooling จะดูดซับความร้อนแฝงของการแข็งตัวแบบเดนไดรต์ (กิตติพงษ์, 2553)

แสดงดังรูปที่ 2.12 และ 2.13



รูปที่ 2.12 ถ้าของเหลวผ่าน Undercooling ของแข็งที่เกิดขึ้นที่ Interphase ระหว่างของเหลว และ ของแข็งสามารถเติบโตเป็นเดนไดรต์ ความร้อนแฝงของการหลอมละลายจะสูญเสียไปจากของแข็งทำให้อุณหภูมิของของเหลวเพิ่มขึ้น และทำให้ของเหลวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงอุณหภูมิระดับการแข็งตัว

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

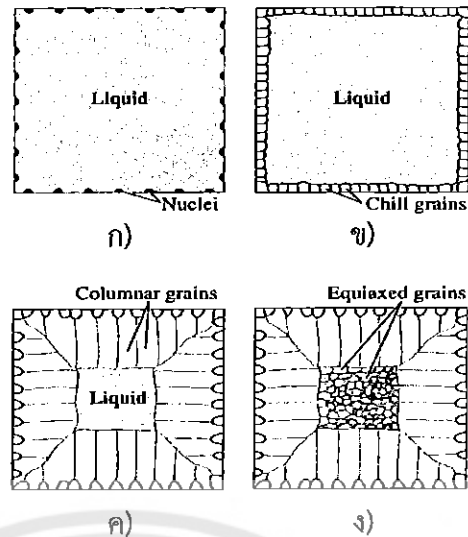


รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเดนไดรต์ในเหล็กกล้า

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

2.6.3 ลักษณะเกรนในการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ

เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงในแบบหล่อ น้ำโลหะที่สัมผัสผนังแบบหล่อจะเย็นตัวลงทำให้เกิดเป็นนิวเคลียสที่เป็นของแข็งขึ้นมาก่อนจึง แสดงดังรูปที่ 2.14 หลังจากนั้นจะแบ่งโครงสร้างได้ออกเป็น 3 บริเวณ คือ (กิตติพงษ์, 2553)



รูปที่ 2.14 การเกิดเกรนของชิ้นงานหล่อขณะแข็งตัว

ก) เริ่มเกิดนิวเคลียส

ข) บริเวณเย็นเร็ว

ค) การเติบโตของเกรนทำให้เกิดเกรนคอลัมน์นาร์

ง) การเกิดนิวเคลียสในแกนกลางทำให้เกิดเกรนอควิแอกซ์

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

2.6.3.1 บริเวณเย็นเร็ว (Chill Zone)

เป็นบริเวณเล็กๆ แคบๆ ที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานหล่อกับแบบหล่อ นิวเคลียสเกิดขึ้นได้ง่ายที่สุดบริเวณผิวสัมผัสแบบหล่อ เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียด การโตของเกรนมีทิศสวนทางกับการถ่ายเทความร้อน โดยการโตจะตั้งฉากกับผนังแบบหล่อ (กิตติพงษ์, 2553)

2.6.3.2 บริเวณเกรนคอลัมน์นาร์ (Columnar Zone)

เกรนมีลักษณะยาว (Elongated Grain) และมีทิศทางความยาวตามทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากใจกลางชิ้นงานไปสู่เขตเย็นเร็ว

2.6.3.3 บริเวณเกรนอควิแอกซ์ (Equiaxed Zone)

เกรนมีขนาดใหญ่ หยาบ มักเกิดบริเวณใจกลางของชิ้นงาน เกรนชนิดนี้จะมี การถ่ายเทอุณหภูมิที่ช้าเกินไป เกรนอควิแอกซ์จึงเกิดการเติบโตในทุกทิศทางเท่าๆ กันทำให้มีสมบัติ สมมาตรกันในทุกๆ ทิศทางเช่นเดียวกัน

2.7 การกวนหล่อ (Stir casting)

การกวนหล่อ เป็นวิธีการที่ทำให้ส่วนผสมแรงมีการกระจายตัวได้ดีในเนื้อพื้น โดยวิธีการนี้จะทำได้เมื่อวัสดุเนื้อพื้นเกิดการละลายแล้ว เมื่อเริ่มกวนจะทำให้เกิดการวนของน้ำโลหะ และทำให้ส่วน

เสริมแรงหมุนวนอยู่ด้านข้าง โดยการกวนทำได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลาไม่ก่นาที่ก่อนที่จะเทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อ

ข้อเสีย การกวนจะทำให้เกิดฟองอากาศ และทำให้สิ่งเจือปนเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะที่หลอมเหลว จะทำให้เกิดรูพรุน และสารมลทินในเนื้อโลหะได้

2.8 กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting)

โลหะผสมอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติด้านการหล่อที่ดีชนิดหนึ่ง เพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้สามารถหล่อรูปร่างต่างๆ ได้สะดวกแม้มีรูปร่างที่ซับซ้อน หรือชิ้นงานหล่อที่มีความบางมากก็ตาม การหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถใช้เทคนิคการหล่อได้หลายวิธี เช่น วิธีการหล่อด้วยแบบหล่อทราย หล่อด้วยแบบหล่อปูน-พลาสติก (Plaster Molding) หรือหล่อด้วยแบบหล่อขี้ผึ้ง (Investment Casting) ซึ่งล้วนเป็นกระบวนการหล่อเพียงครั้งเดียวไม่สามารถนำแบบหล่อกลับมาใช้ได้อีก ส่วนการหล่อด้วยแบบหล่อถาวรเป็นกระบวนการหล่อที่ใช้แบบหล่อเพียงแบบหล่อเดียว แต่สามารถผลิตชิ้นงานหล่อได้หลายชิ้น

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมกับอะลูมินาในแบบหล่อถาวร โดยแบบหล่อนั้นมี 2 ส่วน ที่นำมาประกบกันยึดติดด้วยอุปกรณ์ช่วยยึดแน่น และสามารถแกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อภายหลังการเทน้ำโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อได้ง่าย เพื่อความสะดวกในการทำงานให้เกิดความรวดเร็ว

2.8.1 อุณหภูมิแบบหล่อ

อุณหภูมิของแบบหล่อถาวรมีผลกระทบต่อ การเกิดจุดบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อได้ ผลกระทบของอุณหภูมิแบบหล่อ มีดังนี้

2.8.1.1 อุณหภูมิแบบหล่อสูง (High Mold Temperature)

มีผลเสียในเรื่องความถี่ของรอบการปฏิบัติงานนานๆ (Longer Cycle Time In Production) และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานต่ำลง แต่มีข้อดีในเรื่องความแตกต่างของอุณหภูมิแบบหล่อกับน้ำโลหะที่มีความแตกต่างทางความร้อนน้อย (Low Thermal Gradient)

2.8.1.2 อุณหภูมิแบบหล่อต่ำ (Low Mold Temperature)

ส่งผลเสียขึ้นกับชิ้นงาน เช่น ทำให้น้ำโลหะแข็งตัวปิดทางเดินน้ำโลหะหลอมเหลว (Cold Shuts) ก่อนที่โลหะหลอมเหลวจะเต็มเต็มแบบหล่อ ทำให้กระบวนการผลิตนั้นจะเกิดข้อผิดพลาด เกิดการหดตัว เกิดการแตกร้าวขณะร้อน

2.8.2 สารเคลือบผิวแบบหล่อ และชนิดสารเคลือบผิวแบบหล่อ

ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นต่างกัน และยังทำให้ความหนาของแบบหล่อนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น ในกรณีที่มีการเคลือบผิวของแบบหล่อ ส่งผลต่อความหนาของแบบหล่อที่ใช้

เปลี่ยนไป จึงทำให้อุณหภูมิของแบบหล่อต่ำลง ผิวของชิ้นงาน และความหนาของชิ้นงานที่ได้นั้นเปลี่ยนไปด้วย

2.8.3 อุณหภูมิการหลอม และอุณหภูมิเทน้ำโลหะ (Pouring Temperature)

อุณหภูมิในการหลอมโลหะผสมจะปรับเปลี่ยนไปตามชนิดของเตาที่ใช้ ธาตุผสมของโลหะ น้ำหนักของชิ้นงานหล่อ การเคลือบผิวที่แบบหล่อ ระบบทางเดินของโลหะหลอมเหลวภายในแบบหล่อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลว ซึ่งจะต้องหาอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวที่เหมาะสมที่สุดสามารถอธิบายได้ 2 กรณี ดังนี้

2.8.3.1 อุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวต่ำ (Low Pouring Temperature)

อาจทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่ไม่เต็มแบบหล่อ เพราะระบบทางเข้า หรือรูสันเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะมีการแข็งตัวของชิ้นงาน และความหนาของรอยต่อระหว่างหน้ากับบางของแบบหล่อ เกิดการแข็งตัวรวดเร็ว จะขัดขวางการแข็งตัวของส่วนอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดจุดตำหนิต่างๆ เช่น รูพรุน ทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีคุณภาพ และเกิดรอยต่อระหว่างโลหะหลอมเหลวแข็งปิดทางเดินโลหะหลอมเหลว

2.8.3.2 อุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวสูง (High Pouring Temperature)

ที่ทำให้เกิดการหดตัวสูง เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงนั้น ขนาดของชิ้นงานที่ได้จึงมีขนาดไม่แน่นอน และจะทำให้ธาตุที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียมเกิดการสูญเสียหรือสูญเสีย (Heat Loss) ได้มาก นอกจากนี้ยังส่งผลต่อเวลาของกระบวนการแข็งตัวที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังลดอัตราการผลิต และมีอายุการใช้งานของแบบหล่อด้วย

2.8.4 ข้อดีของกระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร

- 2.8.4.1 อัตราการผลิตสูง
- 2.8.4.2 ผิวของชิ้นงานสุดท้ายมีความแม่นยำสูง
- 2.8.4.3 เศษโลหะเหลือน้อย
- 2.8.4.4 เหมาะกับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากๆ

2.8.5 ข้อเสียของกระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร

- 2.8.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ราคาสูง
- 2.8.5.2 ใช้กับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
- 2.8.5.3 จำกัดขนาด และรูปร่างของชิ้นงาน
- 2.8.5.4 มีค่าความเผื่อสูงกว่ากระบวนการหล่อโลหะแบบหล่อทรายขึ้น

2.9 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนั้น เพื่อต้องการทราบอิทธิพลของธาตุผสมนั้นๆ อีกทั้งยังจะสามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ภายหลังจากการกระทำทางความร้อนสูงสุด ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจึงสามารถนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ สามารถกระทำได้ 2 ลักษณะ คือ

2.9.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscope)

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนี้ จะเป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า หรือถ้าใช้กล้องขยายก็มีกำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า ลักษณะการเตรียมชิ้นงานนั้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูปทรงภายในของโลหะ การมีแยกชั้นของผลึก รอยร้าว รอยแตก หน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาณธาตุที่ผสมในโลหะ เป็นต้น

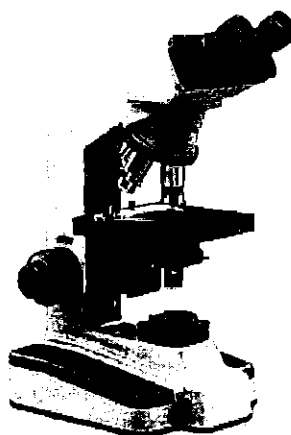
2.9.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะทำให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้

2.9.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope ; OM)

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ใช้ขยายที่ขอบเขตของการมองเห็นได้อีกชนิดหนึ่งที่มนุษย์สร้างขึ้นมาใช้สำหรับส่องดูวัตถุเล็กๆ ให้เห็นยิ่งชัดขึ้นกล้องจุลทรรศน์แบบแสง คือกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงใช้ส่องให้เห็นวัตถุ ขยายใหญ่กว่าเดิมได้อย่างมากที่สุดที่ประมาณสองพันเท่า ไม่อาจมีกำลังขยายที่ใหญ่ขึ้นไปกว่านี้อีกได้แล้ว เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นภายในกล้องจุลทรรศน์เป็นภาพที่เกิดจากคลื่นแสง ซึ่งมีขีดจำกัดขึ้นกับขนาดของภาพกับช่วงคลื่นของแสง ถ้าภาพมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับช่วงคลื่นของแสง ก็จะไม่อาจส่องขยายภาพให้เห็นใหญ่มากๆ ได้ แสดงดังรูปที่ 2.15

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงนี้ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ จึงสามารถที่จะช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดที่ได้สูงสุด ในระดับหนึ่งของช่วงแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตร หรือเพียงเท่านั้นเอง (หรือที่ดัดที่สุดก็อาจอยู่ในช่วงระดับความละเอียดตั้งที่ 200-400 นาโนเมตร) (วิรุจน์, 2553)



รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

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

2.9.2.2 วิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ขั้นแรก วางชิ้นตรวจสอบบนที่วางชิ้นงานของกล้องจุลทรรศน์ และที่วางชิ้นตรวจสอบนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับชิ้นงานตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยังเป็น การปรับระยะที่ชัดเจนของภาพอีกด้วย ขั้นที่สอง เปิดสวิตช์ และปรับความเข้มของแสงได้ตามต้องการ ขั้นที่สาม ปรับระยะชัดของภาพ (Focus) จึงจะสามารถปรับได้ 2 ระบบ คือการปรับหยาบ (Coarse Focus Control) จะสามารถปรับระยะชัดของภาพได้รวดเร็วขึ้น แต่จะให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ แต่สำหรับการจะปรับละเอียด (Fine Focus Control) นั้น จะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มี ความผิดพลาดเกิดขึ้น ขั้นที่สี่ เมื่อต้องการถ่ายภาพไว้ ในกรณีที่กล้องจุลทรรศน์นั้น สามารถที่จะติดตั้งกล้องเพื่อถ่ายภาพเก็บไว้ และขั้นสุดท้าย เมื่อต้องการหยุดการทำงานแล้วให้ปิดสวิตช์ ปรับเลนส์วัตถุให้อยู่ในตำแหน่งกำลังขยายที่ต่ำสุด ปรับที่วางชิ้นตรวจสอบเคลื่อนที่ลงให้สุด และนำชิ้นงานตรวจสอบออกจากที่วาง (วิรุจน์, 2553)

2.10 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในการตรวจสอบ

ในการเตรียมชิ้นงานนี้จะต้องขัดด้วยผงขัด ทำหน้าที่จะขัดถูรอยกระดากหรือรอยออกจากผิวชิ้นงาน ผงขัดที่มีขนาดละเอียดมากๆ จะยิ่งทำให้ผิวของชิ้นงานเรียบยิ่งขึ้นเท่านั้น การเตรียมชิ้นงานจะเสร็จสิ้นขึ้นอยู่ กับคุณภาพของผิวชิ้นงานที่เราต้องการ และการเตรียมชิ้นงานจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ การขัดระนาบ ละเอียด และการขัดมัน (Polishing)

2.10.1 การขัดระนาบ และการขัดละเอียด

ปกติแล้วในขั้นตอนนี้จะเอาผิวของชิ้นงานที่เสียหาย หรือแปรรูปไปบ้างในขั้นตอนการตัดออกไป ในขณะที่เดียวกันที่จะทำให้ผิวที่เกิดขึ้นใหม่เกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.10.1.1 การขัดระนาบ

การขัดระนาบที่เป็นขั้นตอนแรกในการขัดของผิวชิ้นงาน เพื่อที่จะเป็นการปรับแต่งผิวชิ้นงานให้มีระนาบผิวที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยใช้กระดาษทราย

2.10.1.2 การขัดละเอียด

ผิวที่เกิดจากการขัดละเอียด จะมีความเสียหายเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย โดยใช้กระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดต่างกันในการขัด นั้นจะเริ่มจากขัดด้วยกระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดต่ำไปจนถึงมีขนาดละเอียดสูง เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเสียหายเหลือน้อยที่สุด

2.10.2 การขัดมัน

มีวิธีการเหมือนกับการขัดละเอียดเพียงแต่ทำหน้าที่ขัดผิวที่เสียหายเนื่องจากขั้นตอนการขัดละเอียดออกไป เพื่อที่จะได้ผิวที่ดีกว่าโดยไม่ทำให้ผิวเกิดความเสียหายขึ้นอีก และการขัดมันจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.10.2.1 การขัดมันด้วยผงขัดเพชร (Diamond Polishing; DP)

ผงขัดเพชรเป็นผงขัดที่มีอำนาจในการขัดที่สูง และได้ระนาบที่ดีที่สุด จะทำให้ลดเวลาในการขัดลงได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากผงขัดมีความแข็งประมาณ 8000 HV จะทำให้สามารถขัดวัสดุได้ทุกชนิด

2.10.2.2 การขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing; OP)

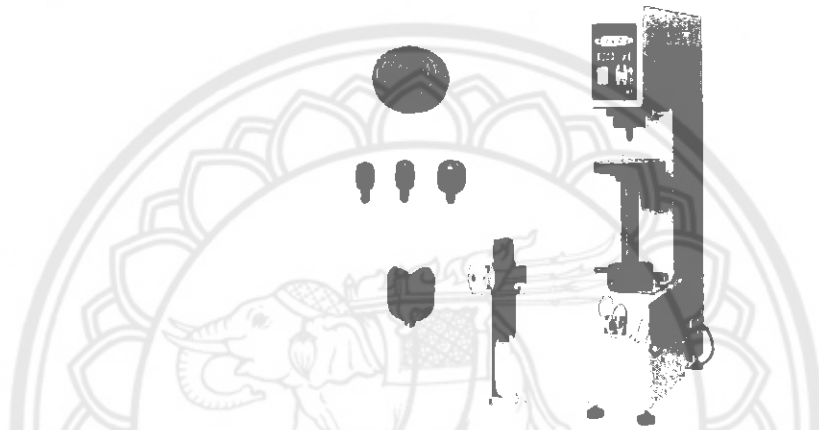
ผงขัดอะลูมินา เป็นการขัดมันวัสดุที่มีความเหนียว

2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง เป็นการวัดความต้านทานต่อรอยกด รอยขีดข่วน หรือการแปรรูปถาวร (Plastic Deformation) ของวัสดุ ซึ่งความแข็งของวัสดุนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างพันธะ โดยได้ที่มีวิธีการทดสอบหลายวิธีที่นิยม เช่น บรินเนล (Brinell Hardness Test) ร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test) วิคเกอร์ (Vicker Hardness Test) และนูบ (Knoop Hardness Test) ที่ใช้ในการทดสอบ เป็นต้น วิธีการทั้งหลายเหล่านี้นิยมใช้กันทั่วไปในการทดสอบความแข็งทางวิศวกรรม และแต่ละวิธีได้มีกฎพื้นฐานเดียวกัน คือความแข็งวัดจากรอยกดที่เกิดขึ้นด้วยการให้น้ำหนักกดลงบนหัวกดที่ผิวของวัสดุในช่วงเวลาจำกัด

2.11.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าที่ชุบแข็ง หรือลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภายใต้ภาระ 3,000 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุที่อ่อนสามารถลดภาระที่ 1,500 กิโลกรัมแรง หรือ 500 กิโลกรัมแรง เพื่อหลีกเลี่ยงรอยกดที่มากเกินไป ปกติจะคงภาระไว้ที่ประมาณ 10–15 วินาที ในกรณีที่เหล็กหล่อ เหล็กกล้า และในกรณีที่โลหะอื่นๆ จึงใช้เวลาเป็นอย่างน้อยประมาณ 30 วินาที ขนาดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เหลืออยู่บนวัสดุทดสอบจะถูกวัดโดยกล้องขยายกำลังต่ำ ค่าความแข็งคำนวณจากการหารภาระที่ใช้ด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด



รูปที่ 2.16 เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

ที่มา : http://www.tonanasia.com/brinell_hardness_tester_spec.php?id_prd=282

ในการวัดค่าความแข็งการกดหัวบอลลงบนผิวชิ้นงานจะเกิดการแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแสดงดังรูปที่ 2.17 โดยทำการกดหัวบอลบนผิวชิ้นงานเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที หลังจากนั้นปล่อยน้ำหนัก และหัวกดออก แล้วทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดจำนวน 2 ค่า โดยใช้กล้องที่มีกำลังขยายต่ำ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะถูกนำมาคำนวณค่าความแข็ง จากค่าน้ำหนักกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 2.2

$$HB = \frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

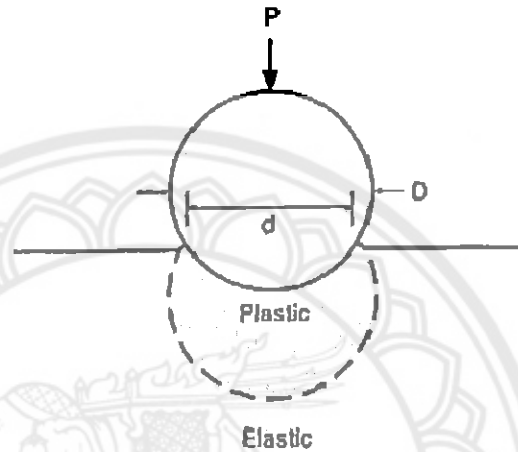
เมื่อ P คือ น้ำหนักกด (กิโลกรัมแรง)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวบอล (มิลลิเมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (มิลลิเมตร)

โดยทั่วไปแล้ว ควรมีการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งโดยการปรับสภาพผิวของชิ้นงานให้ราบเรียบ และปราศจากเศษโลหะ หรือสิ่งสกปรกตกค้าง เพราะปัจจัย

เหล่านี้อาจทำให้ได้ค่าความแข็งที่วัดได้ไม่ถูกต้อง ส่วนข้อดีของการวัดความแข็งแบบบริเนล คือการใช้ขนาดของหัวกดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สามารถวัดความแข็งของชิ้นงานที่มีความแตกต่างทางโครงสร้างมาก ๆ หรือมีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ (Microstructural Heterogeneity) ได้ และหากพื้นผิวของชิ้นงานมีรอยขีดข่วน (Scratch) หรือผิวหยาบ (Roughness) เพียงเล็กน้อยก็จะเป็นผลทำให้ค่าความแข็งที่ได้ผิดพลาด แต่การวัดความแข็งแบบบริเนลนี้อาจมีความผิดพลาดจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เกิดขึ้นได้จากตัวผู้วัดเอง และยังมีข้อจำกัดในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.17 การแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล
ที่มา : ฐานันท์ (2554)

2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้าง และสมบัติบางประการของสสาร ค่าความชัดลึก (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งนี้เป็นเพราะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ภาพที่ได้มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDXS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WED เพื่อตรวจสอบชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบทางเคมี เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงเคมีอีกด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า จึงเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา วิทยาศาสตร์ และอีกหลายสาขา แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

2.12.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ

2.12.1.1 การดูลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของพื้นผิวโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของ Detector ได้ โดยแบ่งเป็น

ก. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Secondary Electron จะได้ภาพที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความสูงต่ำ ขรุขระ ที่เกิดขึ้นจริงบนตัวอย่าง และสามารถวัดขนาดต่างๆ บนตัวอย่างนั้นได้

ข. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Back Scattered Electron จะได้ภาพที่มีลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุนั้น ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่า จะมีเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

2.12.1.2 การวิเคราะห์ธาตุสามารถใช้ข้อมูลได้เป็น 2 ลักษณะ คือหาธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างว่ามีธาตุใดบ้าง โดยแสดงออกมาเป็นกราฟ และบอกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุนั้นๆ และสามารถบอกเป็นพื้นที่ว่าบริเวณใดมีธาตุใดอยู่บ้าง

2.12.2 ลักษณะของตัวอย่าง และชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

2.12.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในแบบทั่วไป

- ก. อยู่ในสถานะของแข็งทุกลักษณะ เช่น เป็นผง เป็นแผ่น เป็นแท่ง ฯลฯ
- ข. ถ้ามีขนาดใหญ่ต้องตัดส่วนที่จะดูให้เล็กอยู่ที่ประมาณ 1 ลูกบาศก์-เซนติเมตร
- ค. ต้องแห้งไม่มีความชื้น ไม่มีการระเหยของสารใดๆ และไม่มีการฟุ้งกระจายของตัวอย่าง
- ง. ถ้าตัวอย่างมีการนำไฟฟ้าดีจะสามารถนำเข้าเครื่องกล้องจุลทรรศน์-อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดูได้เลย

2.12.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในแบบตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า

- ก. โดยทั่วไปจะเหมือนการเตรียมตัวอย่างแบบทั่วไป
- ข. ต้องมีการเคลือบทองคำก่อนจึงจะสามารถนำเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้
- ค. การใช้งานในระบบนี้จะใช้ได้ยากกว่าแบบปกติ และเสียเวลามากกว่าปกติ ดังนั้นจึงสามารถทำให้ได้บางกรณีเท่านั้น

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

สำหรับตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจไม่ต้องทำการเคลือบ โดยเลือกให้ความต่างศักย์น้อยๆ (ต่ำกว่า 3 กิโลโวลต์) ซึ่งภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะไม่เกิดการสะสมประจุที่ผิว (Charging) เนื่องจากปริมาณกระแสเข้าให้เท่ากับกระแสออก หรือเลี้ยงไปใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบสุญญากาศต่ำแทน (บัญชา และศุภกานูจน์, 2554)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohsen Hossein-Zadeh และคณะ (2012) ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโลหะอะลูมิเนียม/อะลูมินา โดยใช้อะลูมินาที่ผ่านกระบวนการบดด้วยบอลลมเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ให้มีขนาดอนุภาคเป็นนาโนเมตร ใช้เตาไฟฟ้าในการหลอมโลหะอะลูมิเนียมโดยใช้อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส และมีการเติมก๊าซอาร์กอนภายในเตา เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งใช้ความเร็วในการกวน 450 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ 800 องศาเซลเซียส ใช้แบบหล่อที่ทำจากเหล็กกล้า และชิ้นงานที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร พบว่าอนุภาคของอะลูมินากระจายตัวได้ดีในเนื้อของโลหะอะลูมิเนียม วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีกลไกการเกิดนิวเคลียสที่เป็นแบบ

วิวิธพันธ์ วัสดุเชิงประกอบมีโครงสร้างจุลภาคที่มีความละเอียดมากกว่าโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า ในการเติมอะลูมินาขนาดอนุภาคนาโนเมตรจะช่วยลดการสึกหรอ 0.0199-0.0015 กรัม ในระยะ 1200 เมตร

S.A. Sajjadi และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ ขนาดอนุภาคของผงอะลูมินา โดยใช้ขนาดเป็นไมโครเมตร และนาโนเมตร ความเร็วในการกวนหล่อที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความแข็งแรงอัดของวัสดุประกอบ โลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ด้วยวิธีกวนหล่อ โดยมีการเติมก๊าซอาร์กอนให้กับน้ำโลหะในระหว่างการกวน พบว่าก๊าซอาร์กอนจะทำให้การเข้ากันระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 กับอะลูมินาได้ดี เมื่อใช้ความเร็วในการกวน 300 รอบต่อนาที จะมีการกระจายตัวของอะลูมินาที่ดีที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณ และลดขนาดของอะลูมินา จึงจะทำให้มีความสามารถในการเปียกผิวลดลง ความแข็ง และความพรุนตัวเพิ่มขึ้น ปริมาณที่ดีที่สุด คือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอนุภาคขนาดไมโครเมตร และร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในอนุภาคขนาดนาโนเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมินาจะทำให้ค่าความแข็งแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าอนุภาคขนาดนาโนเมตร ค่าความแข็งแรงอัดจะมากกว่าอนุภาคขนาดไมโครเมตร

A. Mazahery และคณะ (2009) ได้ทำการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ให้มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้ผงอะลูมิเนียมขนาดอนุภาคเฉลี่ย 16 ไมโครเมตร และใช้ผงอะลูมินาขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 นาโนเมตร โดยผงอะลูมิเนียม 450 กรัม และใช้ปริมาณอะลูมินา ร้อยละ 0.75, 1.5, 2.5, 3.5 และ 5.0 โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิในการหลอมผงอะลูมิเนียม 800 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมินาจะทำให้ความละเอียดของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความเหนียวมีแนวโน้มลดลง และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 182 ± 2 เมกกะปาสคาล ความละเอียดของเกรนที่ดีที่สุดคือ 12 ไมโครเมตร

Mohammad B. NDALIMAN และ Akpan P. PIUS (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิการเท และอัตราความเร็วต่อคุณสมบัติเชิงกลของการหล่ออลูมิเนียมผสม ได้ทำการหล่อที่อุณหภูมิการเท และอัตราความเร็วที่แตกต่างกัน ใช้ความเร็วในช่วง 0.2-16 เซนติเมตรต่อวินาที และอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะอยู่ในช่วง 680-720 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างชิ้นงานมาทดสอบคุณภาพ และคุณสมบัติ พบว่าอุณหภูมิของการเทใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียมผสม พบว่าจะได้การหล่อที่มีคุณภาพดี ร่วมกับค่าที่เหมาะสม มีความแข็ง และความแข็งเป็น 65.5 และ 112 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราของการเทที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2.2-2.8 เซนติเมตรต่อวินาที จะได้ค่าความแข็งเป็น 65.4 และ 127 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

Huseyin Sevik และคณะ (2005) ได้ทำการการศึกษาวัดวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม ซิลิคอน/อะลูมินา โดยการใส่ปริมาตรของอะลูมินามีขนาด 0.05, 0.10, 0.15 และขนาด 44, 85, 125 ไมโครเมตร ทำการผลิตโดยเป็นการใช้เทคนิคการหล่อฉีดด้วยแรงดัน ซึ่งทำการตรวจสอบสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง ความแข็งแรงดึง และความต้านทานการเสียดสี ที่มีปริมาตรความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอะลูมินา ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบนั้นที่จะ

เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของอะลูมินา และความแข็งของวัสดุจะลดลงตามขนาดของอนุภาค ความแข็งแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบจะลดลงถ้าสัดส่วนของขนาด และปริมาตรเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการต้านทานการเสียดสีของวัสดุเชิงประกอบจะลดลง ถ้ามีสัดส่วนอนุภาคเพิ่มขึ้น และอัตราสัดส่วนของขนาดลดลง แต่อัตราส่วนการต้านทานการเสียดสีของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้นตามภาวะกระทำทำให้ กลไกการต้านทานการเสียดสีของผิวหน้าที่ไม่ใช่ส่วนเสริมแรงในวัสดุผสมจะเกิดการแปรรูปอย่างถาวร ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบจะนับว่าเป็นการผิดปกตินั้นผิวหน้า

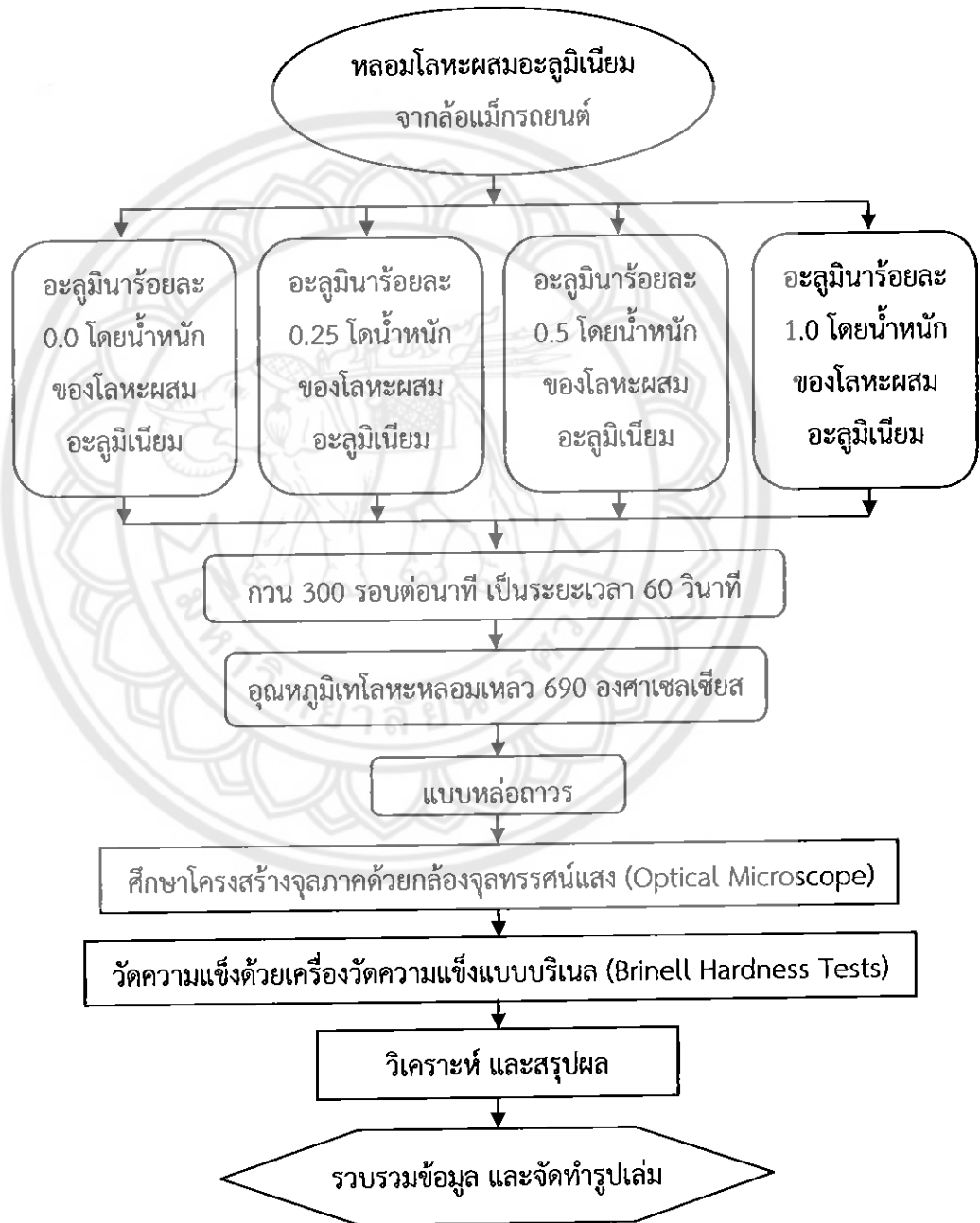


บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

การศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ต่างกัน โดยมีขั้นตอนการดำเนินโครงการ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

3.2.1.1 ล้อแม็ก

ล้อแม็กที่ใช้จัดอยู่ในกลุ่มของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ประเภทไฮโปเทกติก มีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของล้อแม็ก

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิลิคอน	6.78
แมกนีเซียม	0.29
เหล็ก	0.171
แมงกานีส	0.0005
สังกะสี	0.009
ทองแดง	0.004
ไทเทเนียม	0.041
อะลูมิเนียม	Balance

ที่มา : อภินัฐ (2554)

3.2.1.2 อะลูมินา

อะลูมินามีชื่อทางเคมีว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ สูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 ที่พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์รันดัม (Corundum) และโครงสร้างของอะลูมินาที่ประกอบไปด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงสูง อะลูมินาที่ใช้มีขนาด 1 ไมโครเมตร

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เตาลอมโลหะ
- ข. แบบหล่อถาวร
- ค. เทอร์โมคอปเปิล Type K
- ง. เบ้าหลอม
- จ. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ฉ. เครื่องขัดผิวโลหะ
- ช. กระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
- ซ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียด 1 ไมโครเมตร

3.2.2.2 สารเคมี

ก. กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

ข. น้ำกลั่น

3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ก. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

ข. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tests)

ค. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ง. กล้องถ่ายรูป

3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

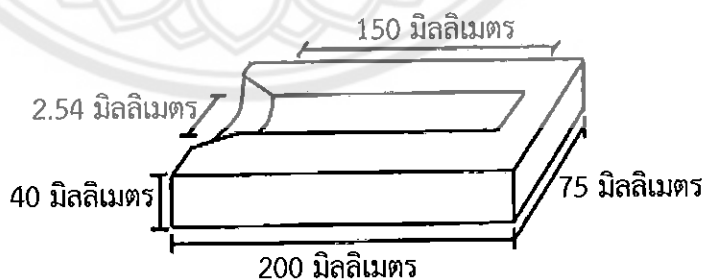
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ-อุปกรณ์

3.3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงาน

นำลวดแมกมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และทำความสะอาดชิ้นส่วนของลวดแมกให้เรียบร้อยเพื่อนำไปทำการหล่อที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อ

3.3.1.2 การเตรียมแม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง คือแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) ซึ่งทำจากเหล็กกล้า รูปร่าง และขนาดของแบบหล่อถาวรมีลักษณะเหมือนกัน 2 ชิ้น มาประกบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร ตามที่กำหนดที่แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบหล่อถาวร

ที่มา : อภินัฐ (2554)

3.3.2 ขั้นตอนการกวนหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมกับอะลูมินา

3.3.2.1 กระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

- ก. นำล้อยแม่ที่ตัดเตรียมไว้มาหลอมจนอยู่ในสถานะของเหลว
- ข. นำอะลูมินาผสมลงไปในน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว ดังนี้
 - ข.1 อะลูมินาปริมาณร้อยละ 0.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม
 - ข.2 อะลูมินาปริมาณร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม
 - ข.3 อะลูมินาปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม
 - ข.4 อะลูมินาปริมาณร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม
- ค. กวนน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับอะลูมินา โดยใช้ความเร็วในการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 วินาที
- ง. เทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อถาวรที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.3



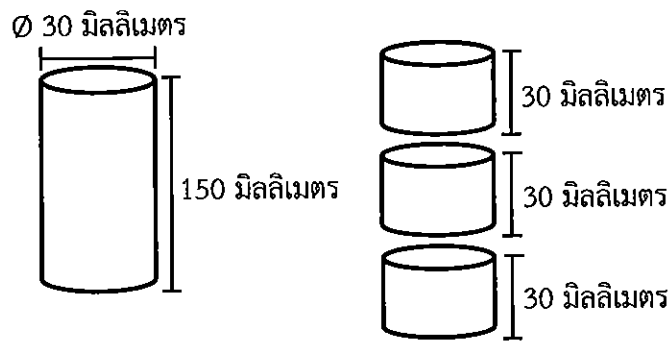
รูปที่ 3.3 การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

- จ. รอให้โลหะหลอมเหลวแข็งตัว และเย็นตัวในแบบหล่อถาวร
- ฉ. แกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อถาวร

3.3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงาน

3.3.3.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

- ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการผ่านกระบวนการกวนหล่อทั้งหมด 3 เงื่อนไข ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร มาตัดแบ่งตามความยาวของชิ้นงานเป็น 3 ชั้น ขนาดชั้นละ 30 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของชิ้นงานและบริเวณที่ขัดกระดาษทราย

ข. นำชิ้นงานที่ได้มาขัดหยาบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

ค. นำชิ้นงานที่ได้ผ่านการขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายมาขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1.0 ไมโครเมตร

ง. นำชิ้นงานที่ได้ผ่านการขัดด้วยผงอะลูมินามากัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ในน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยจุ่มชิ้นงานลงในกรดเป็นเวลา 10 – 15 วินาที ล้างออกด้วยน้ำสะอาด และแอลกอฮอล์ เช็ด และเป่าให้แห้ง

จ. นำชิ้นงานที่ได้ผ่านกระบวนการกัดกรด แล้วนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

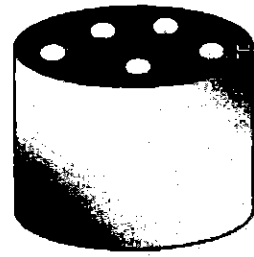
ฉ. นำผงอะลูมินาไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อวัดขนาด

3.3.3.2 การวัดค่าความแข็ง

ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการผ่านกระบวนการกวนหล่อทั้งหมด 3 เงื่อนไข ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร มาตัดแบ่งตามขวางของชิ้นงานเป็น 3 ชั้น ขนาดความสูงชั้นละ 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 3.4

ข. นำชิ้นงานที่ได้มาขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

ค. นำชิ้นงานที่ได้ผ่านการขัดไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล ใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และที่มีน้ำหนักกดทดสอบ 187.5 กิโลกรัมแรง ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที โดยวัดความแข็งชั้นละ 5 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.5



ตำแหน่งที่วัดความแข็ง

รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งรอยกดของชิ้นงาน

3.3.3.2 การส่องผงอะลูมินาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ก. เตรียมผงอะลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร

ข. นำผงอะลูมินาที่เตรียมไว้แล้ว และนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อน แล้วนำเข้า

กล้องจุลทรรศน์ตรอนแบบส่องกราด

ค. บันทึกผล

3.3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

3.3.4.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานแรงดึง

3.3.4.2 นำผลการวิเคราะห์มาศึกษาหาข้อสรุปตามวัตถุประสงค์

3.3.4.3 สรุปผลการทดลอง จัดทำรูปเล่มโครงงาน

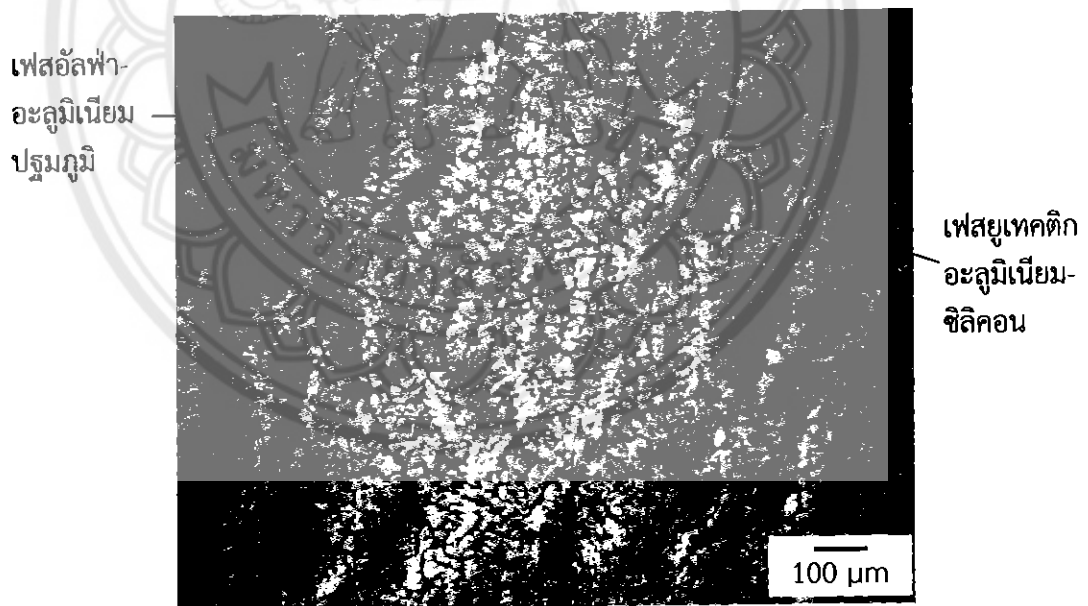
บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองปริมาณของอะลูมินาที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ด้วยกระบวนการทอหล่อ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356

วัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 0 หล่อด้วยวิธีทอหล่อ โดยใช้ความเร็วในการทอ 300 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 วินาที อุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลว 690 องศาเซลเซียส โดยใช้แบบหล่อถาวรที่ทำจากเหล็กกล้า พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ที่มีสีขาว เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ที่มีสีขาวสลับดำแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.1

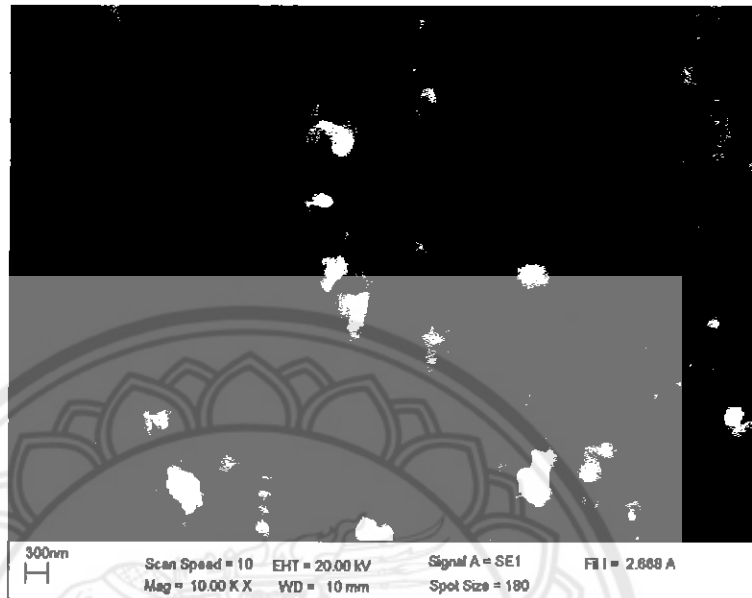


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356

4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอะลูมินา

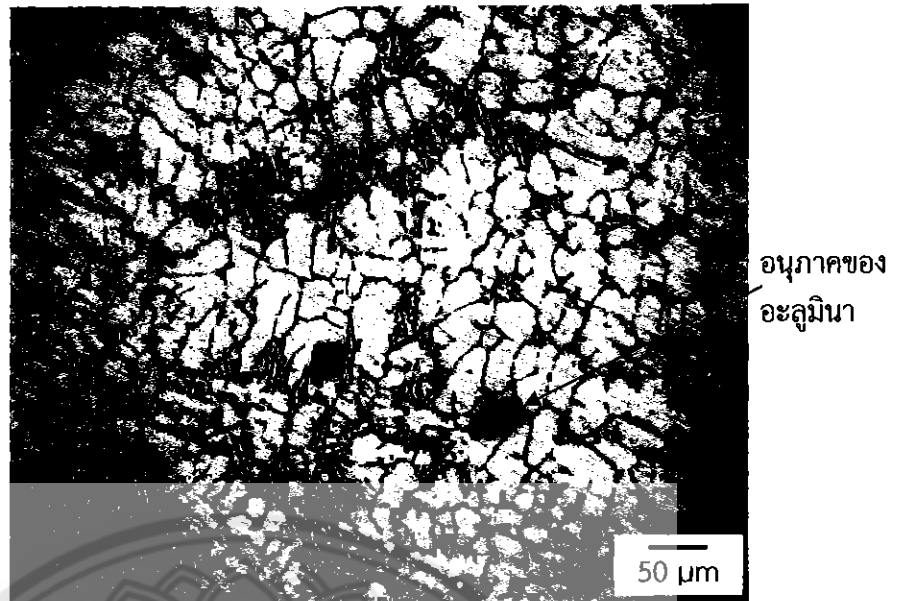
ในการทดลองที่ใช้ผงอะลูมินา อนุภาค (Particles) ขนาด 1 ไมโครเมตร มีรูปร่างอนุภาคที่มีลักษณะค่อนข้างกลม แต่จากการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนของอะลูมินาจากภาพถ่าย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO 1455VP) ด้วยสูตร $D_s = \left(\frac{4A}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนเฉลี่ยของอนุภาคอะลูมินาเท่ากับ 0.558 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO 1455VP) แสดงลักษณะอนุภาคของอะลูมินา ขนาดกำลังขยาย 10000 เท่า

จากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนของอะลูมินาในชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา โดยใช้ความเร็วในการกวาด 300 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 วินาที อุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลว 690 องศาเซลเซียส จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนเฉลี่ยเท่ากับ 21.547 ไมโครเมตร มีลักษณะอนุภาคอะลูมินาเป็นแบบแอกกรีเกต (Aggregate) เนื่องจากอนุภาคอะลูมินามีขนาดเล็ก ส่งผลให้พื้นที่ผิว (Surface Area) มาก ทำให้อนุภาคอะลูมินาเกาะรวมตัวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวอ่อนๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค จึงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนเฉลี่ยใหญ่กว่าอนุภาคอะลูมินาที่ยังไม่ได้ผสมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 แสดงดังรูปที่ 4.3

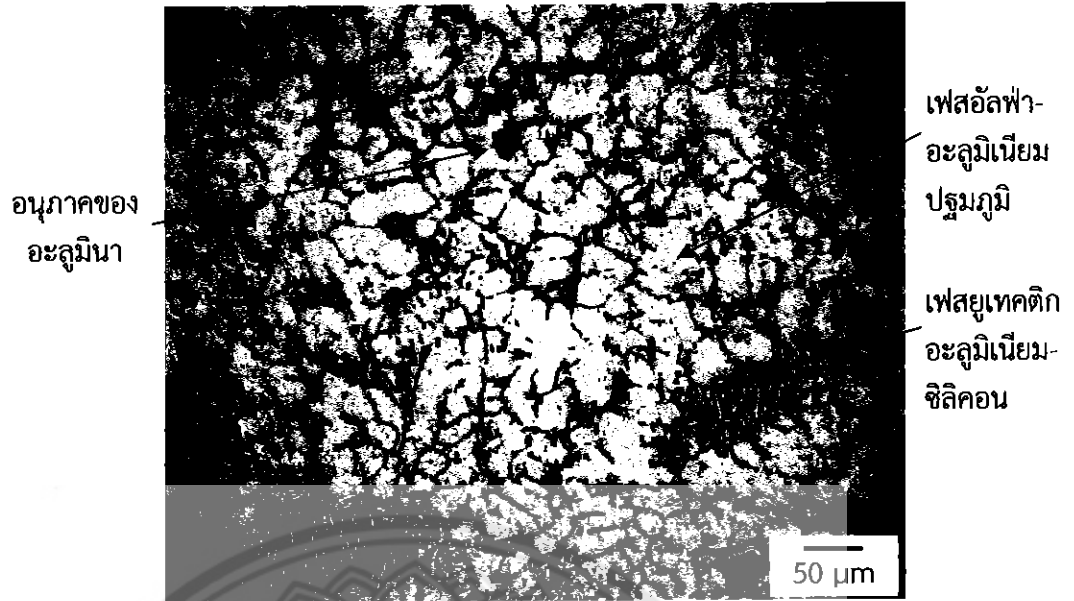


รูปที่ 4.3 ลักษณะอนุภาคของอะลูมินาที่พบในชิ้นงานที่เติมอะลูมินาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา

4.3.1 ชิ้นงานที่มีปริมาณปริมาณร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

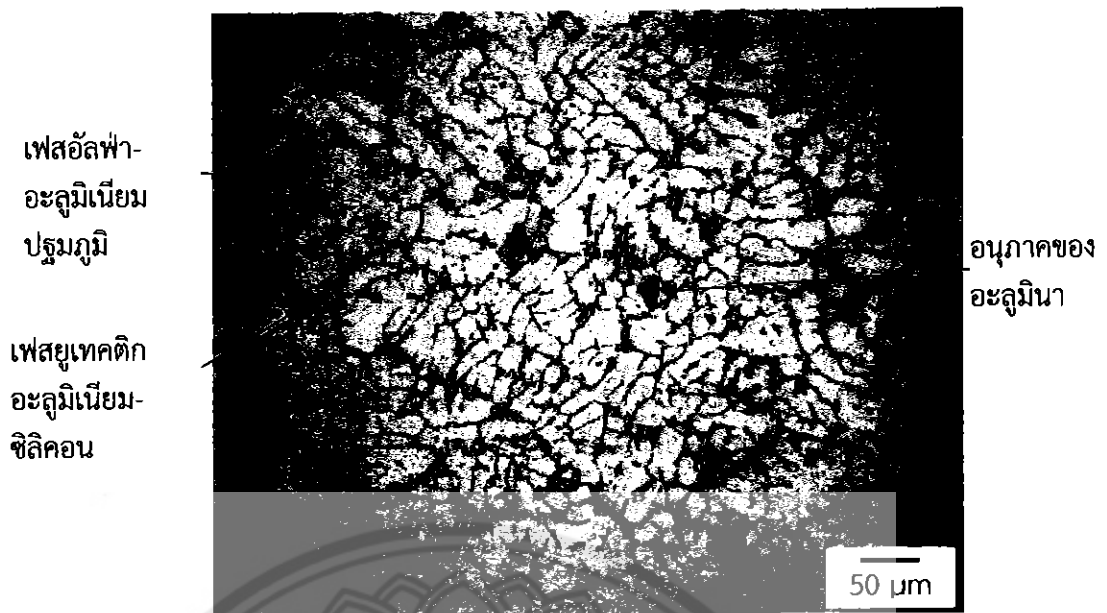
จากการนำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินาแต่ละส่วนมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 0.25 มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ที่มีสีขาว เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ที่มีสีขาวสลับดำแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และอนุภาคของอะลูมินาที่กระจายตัวอยู่ในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเกาะรวมตัวกันเป็นแบบแฉกกรีกेट โปร่งแสง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหมือนเฉลี่ยเท่ากับ 17.700 ไมโครเมตร มีปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานที่ผสมได้จริงร้อยละ 0.14 แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ปริมาณร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

4.3.2 ชิ้นงานที่มีปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

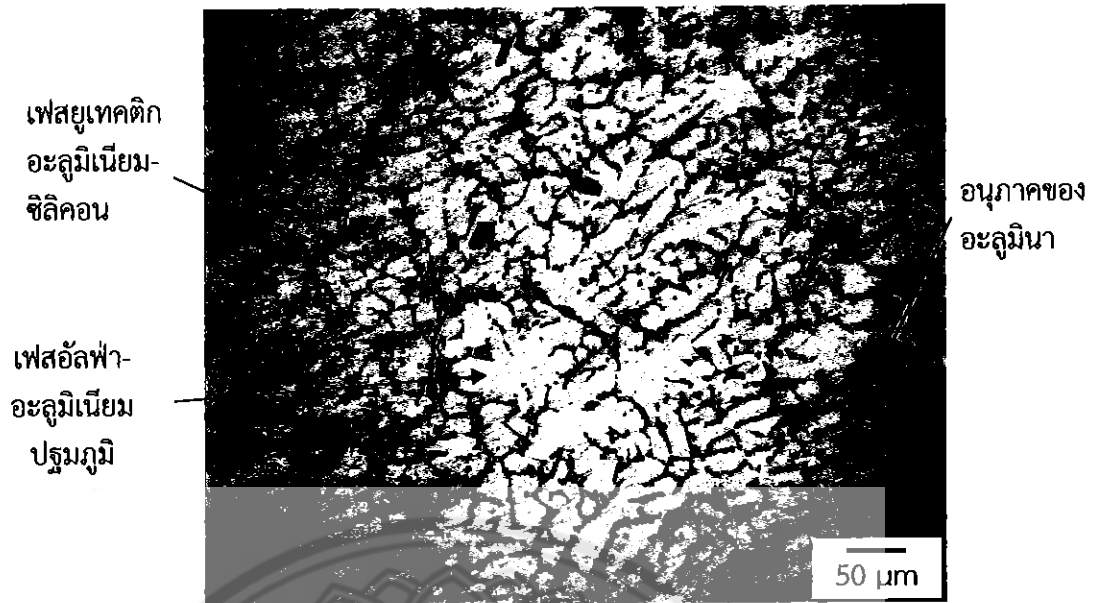
จากการนำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินาแต่ละส่วนมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 0.5 มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ที่มีสีขาว เฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ที่มีสีขาวสลับดำแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และอนุภาคของอะลูมินาที่กระจายตัวอยู่ในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเกาะรวมตัวกันเป็นแบบแอกกรีเกต โปร่งแสง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหมือนเฉลี่ยเท่ากับ 20.422 ไมโครเมตร มีปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานที่ผสมได้จริงร้อยละ 0.20 แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

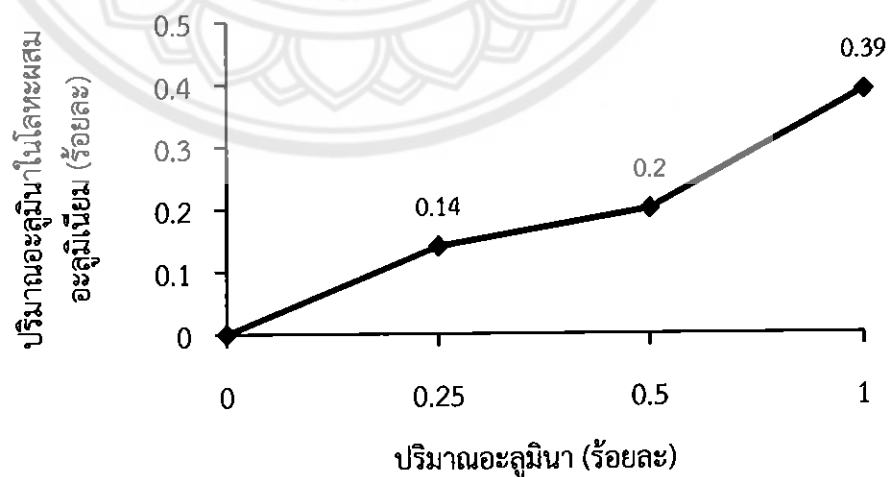
4.3.3 ชิ้นงานที่มีปริมาณปริมาณร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

จากการนำชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินาแต่ละส่วนมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 1.0 มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ที่มีสีขาว เฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ที่มีสีขาวสลับดำแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และอนุภาคของอะลูมินาที่กระจายตัวอยู่ในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเกาะรวมตัวกันเป็นแบบแอกกรีเกต โปร่งแสง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหมือนเฉลี่ยเท่ากับ 25.732 ไมโครเมตร มีปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานที่ผสมได้จริงร้อยละ 0.39 แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ปริมาณร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

จากการศึกษาการหล่อวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิเท 690 องศาเซลเซียส มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกัน คือประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ที่มีสีขาวเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutecti Al-Si) ที่มีสีขาวสลับดำแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และอนุภาคของอะลูมินาที่กระจายตัวอยู่ในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ กับเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน วัดปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียมพบว่ามีความเท่ากับ 0.14, 0.20 และ 0.39 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะลูมินาที่เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 กับปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานเทียบกับพื้นที่ชิ้นงาน

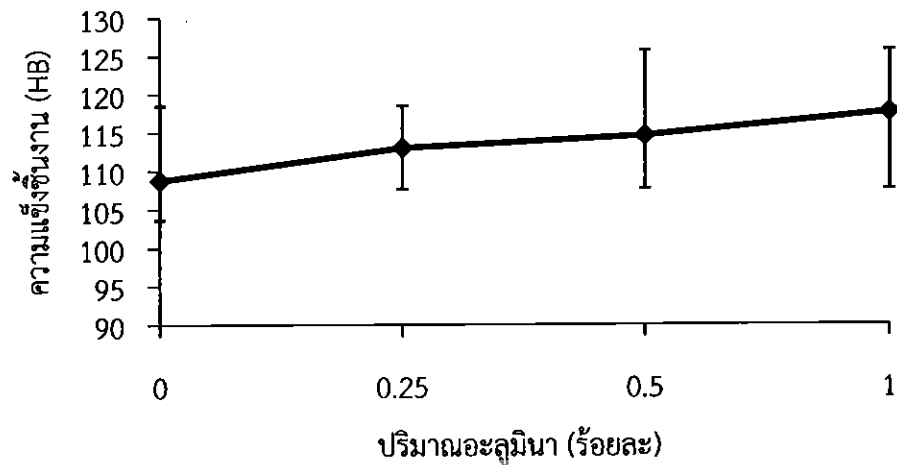
สาเหตุที่ทำให้พบปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานน้อยเนื่องจากเมื่อทำการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 และเติมอนุภาคอะลูมินา พบว่ามีการเป็ยึกผิวที่ต่ำ เนื่องจากที่ผิวหน้าของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวถูกปกคลุมด้วยชั้นออกไซด์ จึงทำให้อุณหภูมิของอะลูมินาบางส่วนจะลอยขึ้นมาอยู่ด้านบนผิวหน้าของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว ไม่ผสมลงไปในโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว ซึ่งการกวนน้ำโลหะจะทำให้ชั้นของออกไซด์ที่ผิวหน้าของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวแตกออกและหมุนวนอยู่รอบเบ้าหลอม จึงทำให้อุณหภูมิของอะลูมินาผสมเข้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้มากขึ้น และบางส่วนจะตกลงที่ก้นเบ้าหลอม เนื่องจากอนุภาคอะลูมินามีความหนาแน่นที่สูงกว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม มีเพียงส่วนน้อยที่อะลูมินาผสมเข้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมได้จริง

อนุภาคของอะลูมินาที่มีขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมินาที่เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 จะทำให้ความสามารถในการเป็ยึกผิวระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 และอะลูมินาต่ำลง จึงทำให้อุณหภูมิของอะลูมินาหลุดออกจากโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ในระหว่างกระบวนการหล่อ (S.A. Sajjadi, 2011)

และอีกปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการเป็ยึกผิวลดลง ได้แก่ Contamination สิ่งเจือปน สิ่งปนเปื้อนที่ผสมลงไป เช่น ผุ่นละออง คาน้ำมัน ทำให้มีการผสมเข้ากันได้ยาก, Process และ Shrinkage

4.4 ความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล โดยทดสอบชิ้นงานละ 5 ตำแหน่ง ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอะลูมินาที่เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 โดยความแข็งในชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม พบว่ามีค่าเท่ากับ 108.783, 113.046, 114.627 และ 117.630 HB ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะลูมินา ร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 กับค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน (HB)

จากผลการทดลองการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบ พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับปัจจัยจากปริมาณอะลูมินาในเนื้อพื้น โดยโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 จะทำหน้าที่เป็นเนื้อมวลหลักและท่อหุ้มส่วนเสริมแรง ส่วนอะลูมินาที่ทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง เมื่อถูกนำไปผสมกับโลหะอะลูมิเนียม A356 จะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโลหะอะลูมิเนียม A356 กับอะลูมินา และเกิดการถ่ายโอนแรงกระทำจากภายนอก โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 จะเป็นตัวกลางในการรับแรงกระทำจากภายนอก จากนั้นโลหะอะลูมิเนียม A356 ก็จะส่งผ่านแรงกระทำทั้งหมดไปยังอะลูมินา ทำให้ความสามารถในการเสริมแรงเพิ่มขึ้น (Reinforcement Mechanism) ซึ่งถ้าวัสดุเชิงประกอบมีปริมาณอะลูมินาที่เป็นส่วนเสริมแรงมาก ก็จะทำให้ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากชิ้นงานมีอะลูมินาเป็นส่วนเสริมแรงที่มีความแข็งแรงมากกว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 จะต้านทานการแปรรูปถาวรในเนื้อชิ้นงาน ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา รวมทั้งปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขของโครงการนี้มีรายละเอียดดังนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกัน เนื่องจากใช้อุณหภูมิเท และวิธีการหล่อที่เหมือนกัน

5.1.2 ชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 0.25, 0.5 และ 1.0 น้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม พบว่ามีปริมาณอะลูมินาในชิ้นงานร้อยละ 0.14, 0.20 และ 0.39 ตามลำดับ

5.1.3 ชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียมมีความแข็งสูงที่สุดเท่ากับ คือ 117.630 HB เนื่องจากมีปริมาณของอะลูมินามากที่สุด โดยอะลูมินาจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในเนื้อชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ควรศึกษาเทคนิคในการหล่อโลหะ เพื่อลด และกำจัดข้อบกพร่อง เช่น รูพรุน ผิวชิ้นงานที่ไม่เรียบ ที่เกิดขึ้นในโครงการ

5.2.2 ในการปฏิบัติงานมีโอกาสเกิดอันตรายจากอุณหภูมิที่สูงที่ใช้ในการหลอมโลหะควรใส่อุปกรณ์ป้องกันความร้อน เพื่อความปลอดภัยขณะปฏิบัติงาน

5.2.3 การหล่อโลหะด้วยกระบวนการกวนหล่อ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการหล่อกึ่งแข็งได้ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานให้ดีขึ้น

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข

5.3.1 ในการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะ ควรใช้อุปกรณ์ในการวัดที่มีความเที่ยงตรง เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้อง และแม่นยำ

5.3.2 ในการตัดชิ้นงาน ควรใช้เครื่องมือตัดที่ทำให้เกิดความร้อนต่ำๆ หรือใช้น้ำยาหล่อเย็นในระหว่างการตัดชิ้นงาน เพื่อไม่ให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง

5.3.3 การทดสอบความแข็งบางครั้งอาจได้ค่าผิดพลาด เนื่องจากการวางชิ้นงานที่เกิดจากการตัด และขัดชิ้นงานไม่ได้ระนาบจึงควรระมัดระวังในการวางชิ้นงาน และการขัดเตรียมชิ้นงานให้ได้ระนาบก่อนการทดสอบความแข็งทุกครั้ง

5.3.4 กรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการกัดผิวชิ้นงานก่อนตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเป็นกรดที่อันตราย ควรเตรียม และใช้อย่างระมัดระวัง

5.3.5 ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ควรขัดผิวชิ้นงานให้เรียบไม่ให้เห็นรอยขีด เนื่องจากจะทำให้เห็นโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานไม่ชัดเจน



เอกสารอ้างอิง

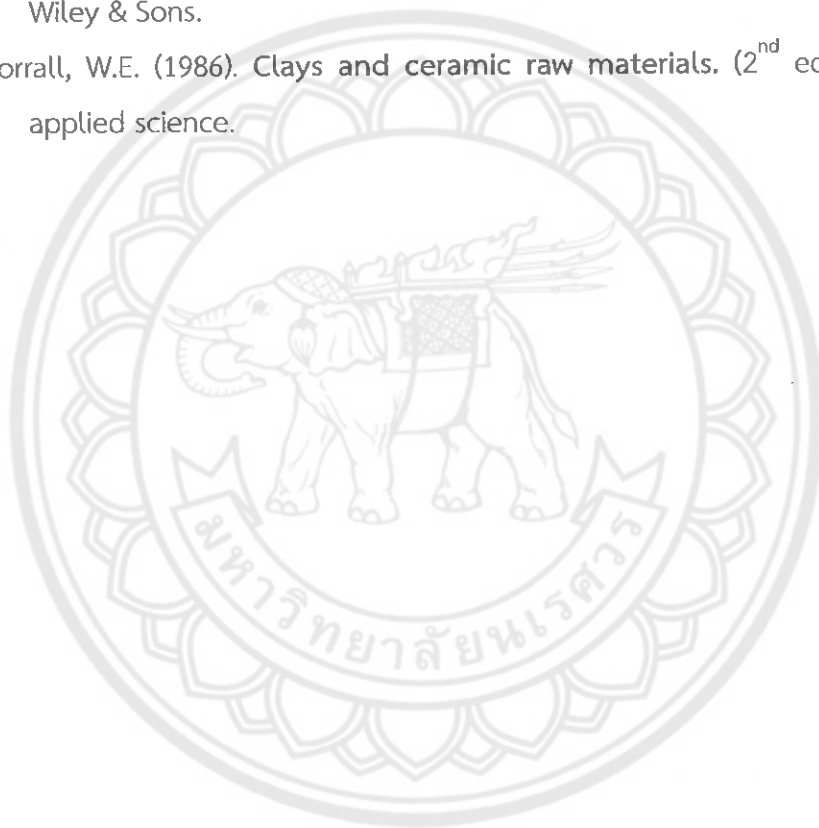
- กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ. (2553). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: พงษ์วารินการพิมพ์ จำกัด.
- จิตติ รินเสนา. (2551). อะลูมินา และการเปียกผิว. นครราชสีมา: วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรม-
เซรามิก), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2555, จาก <http://203.158.6.22:8080/sutir/bitstream/123456789/3159/2/fulltext.pdf>
- ชาลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (2551). โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ. กรุงเทพฯ:
หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางหล่อโลหะ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี.
- ฐาปนีย์ อุดมผล. (2554). การทดสอบความแข็ง. สืบค้นเมื่อ 19 สิงหาคม 2555 จาก http://www.suta.c.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/1_2552/Mech%20met%20lab%20PDF/Mech%20met%20handout-Th/Lab_2Hardness_th.pdf
- ณรงค์ฤทธิ์ โสสะ (2555). โลหะผสมอะลูมิเนียม. สืบค้นเมื่อ 17 สิงหาคม 2555, จาก <http://www.scribd.com>
- บัญชา ธนบุญสมบัติ และศุภกาญจน์ คำมณี. (2545). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ประตูลูกโลก
ระดับจุลภาค. การเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน SEM. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่ง-
ชาติ (MTEC).
- นภิสพร มีมงคล. (2548). โลหะกรรมวัสดุผง. ขนาดอนุภาค. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พรวิสา วงศ์ปัญญา. (2551). การแข็งตัวของโลหะ. นครราชสีมา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย-
เทคโนโลยีสุรนารี.
- ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. การแข็งตัวของโลหะ. สืบค้น
เมื่อ 18 สิงหาคม 2555, จาก [http://www.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/2/
material/ie2302_ch4.pdf](http://www.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/2/material/ie2302_ch4.pdf)
- แมน อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา และธรรมบุญ อุดมมัน. (2551). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
แมคกรอ-ฮิล.
- มนัส สติรจินดา. (2542). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี
(ไทย-ญี่ปุ่น).
- วิรุจน์ บัวงาม. (2553). เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบล-
ราชธานี, จาก <http://www.learners.in.th/blogs/posts/325228>.
- ศิริกาญจน์ ชันส์มฤทธิ. (2555). วัสดุประกอบ (Composite Materials). พิษณุโลก: คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. สืบค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2555, จาก <http://www.sec.psu.ac.th/sem.html>
- สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ซีท. นิยามของคอมโพสิต. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2555, จาก <http://www.physics.kku.ac.th/315205/sites/default/files/chapter10.pdf>
- สุรศักดิ์ ไททวงค์สกุล. อะลูมินา. สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2555, จาก <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/february/radio2-5.htm>
- สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. การแข็งตัวของโลหะ. สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2555, จาก http://eng.sut.ac.th/meta/images/stories/pdf/01-Solidification_of_Metal.pdf
- อนุรัตน์ ภูวานคำ. (2548). การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-มูลโลหะ-เซอร์โคเนีย สำหรับงานทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมเซรามิก), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา. สืบค้นเมื่อ 18 สิงหาคม 2555, จาก http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/1660/2/anurat_fulltext.pdf
- อภิณัฐ ศรีสุวรรณ และวัชรมน ฉัตรคำแบ่ง. (2554). ผลของอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อแม็ก ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบทรายขึ้นและแบบหล่อถาวร. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- A. Mazahery, et al. (2009). Development of high-performance A356/nano- Al_2O_3 composites. University of Tehran of Iran.
- Callister, William D. (2003). Materials science and engineering an introduction. 6th ed. New York : Wiley, c2003.
- Huseyin Sevik and S. Can Kurnaz. (2005). Properties of alumina particulate reinforced aluminum alloy produced by pressure die casting. Sakarya University of Turkey.
- Mohammad B. NDALIMAN and Akpan P. PIUS. (2012). Behavior of Aluminum Alloy Castings under Different Pouring Temperatures and Speeds. Federal University of Technology, Nigeria.
- Mohsen Hossein-Zadeh, et al. (2012). Characterization of properties of Al- Al_2O_3 nano-composite synthesized via milling and subsequent casting. Semnan University of Iran.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Nicholas P. Cheremisinoff. (1990). *Handbook of Ceramics and Composites (Vols 1)*. New York: Marcel Dekker.
- S.A. Sajjadi, et al. (2011). *Microstructure and mechanical properties of Al-Al₂O₃ micro and nano composites fabricated by stir casting*. Ferdowsi University of Iran.
- Upadhyaya, G.S. (1998). *Sintered metallic and ceramics materials*. Kanpur: John Wiley & Sons.
- Worrall, W.E. (1986). *Clays and ceramic raw materials*. (2nd ed). London: Elsevier applied science.

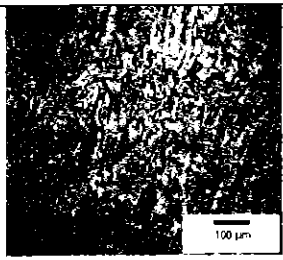
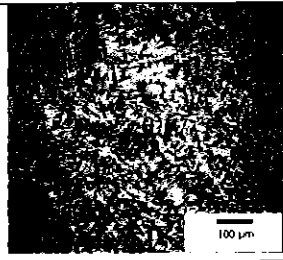
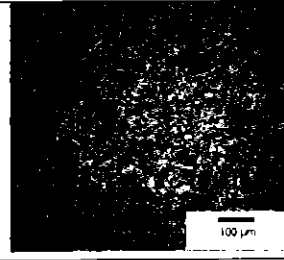
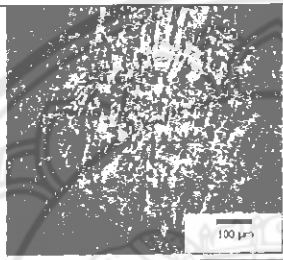
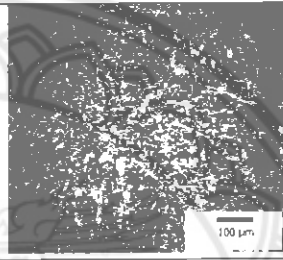
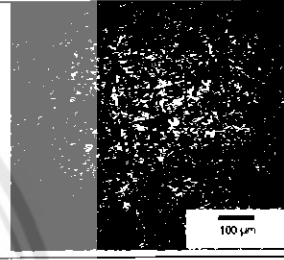
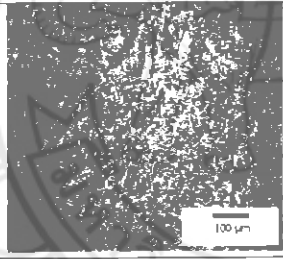
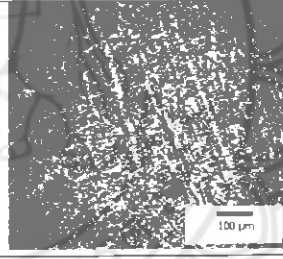
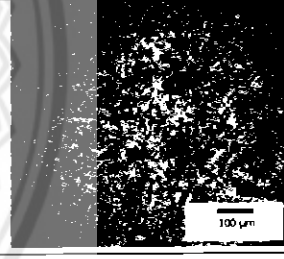
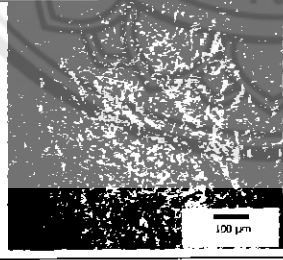
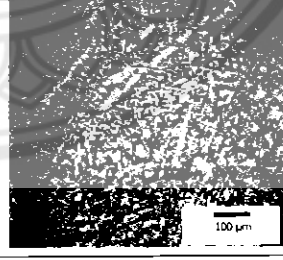
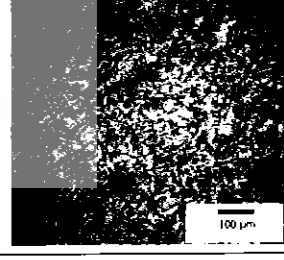
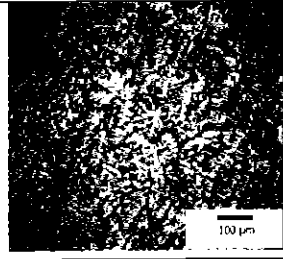
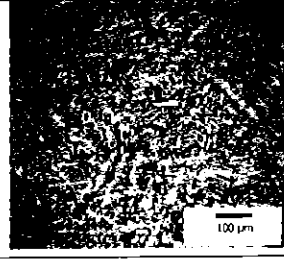
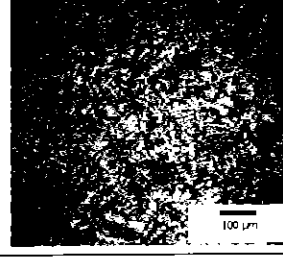




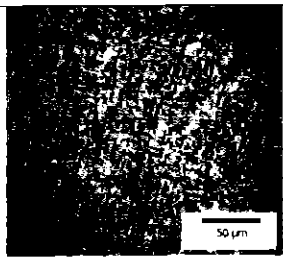
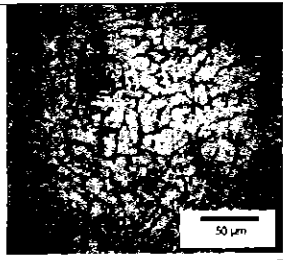
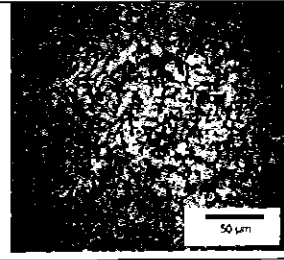
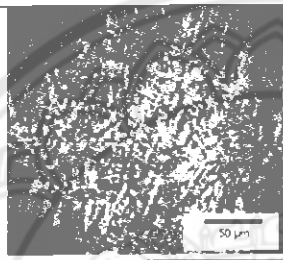
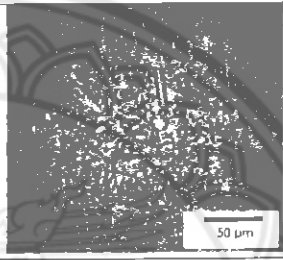
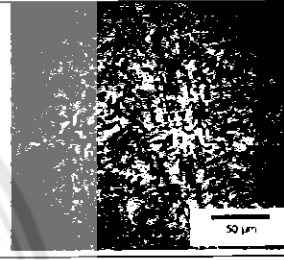
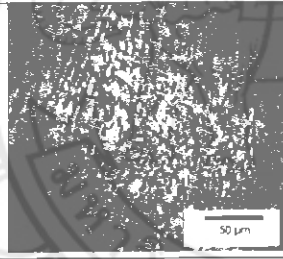
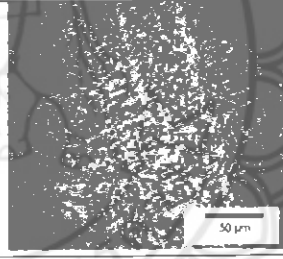
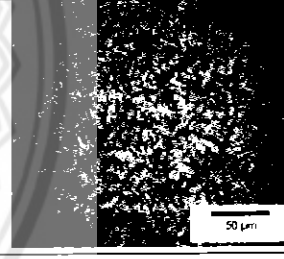
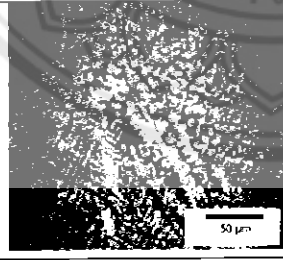

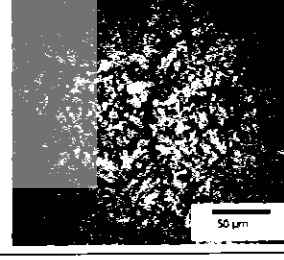
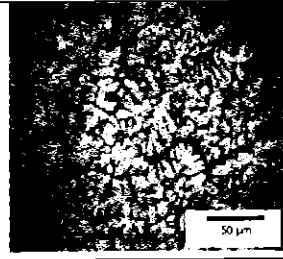
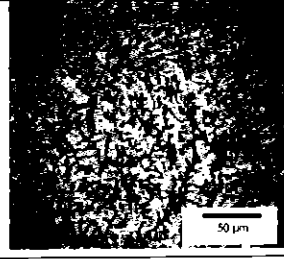
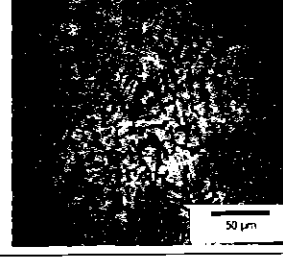
ภาคผนวก ก

โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

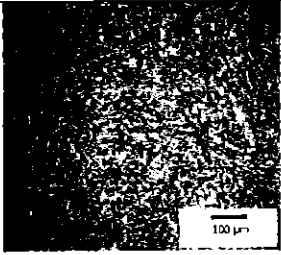
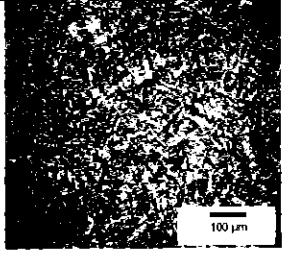
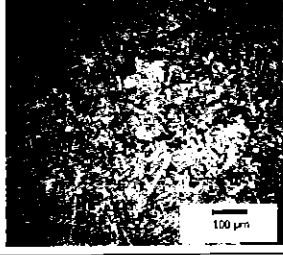
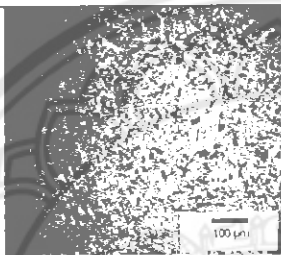
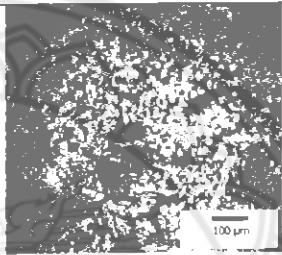
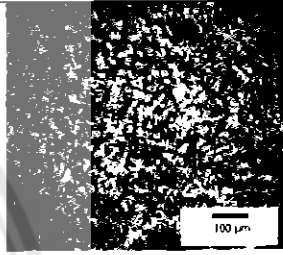
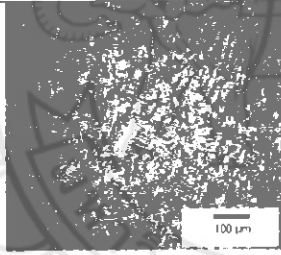
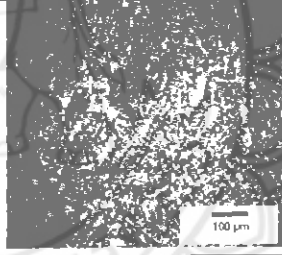
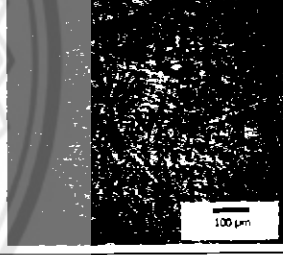
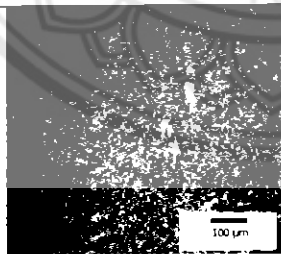
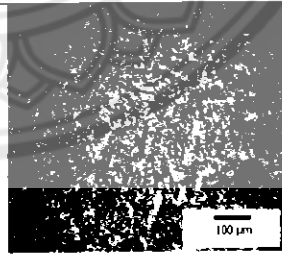
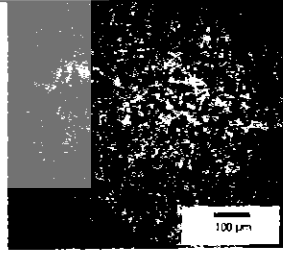
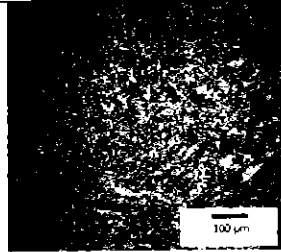
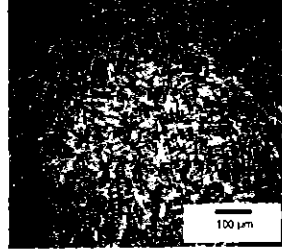
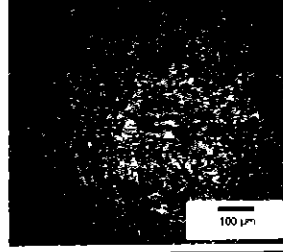
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			

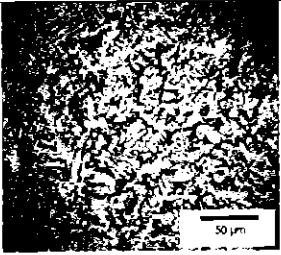
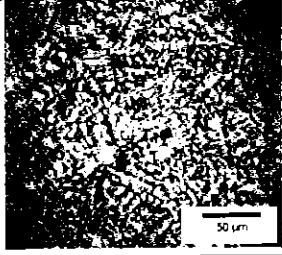
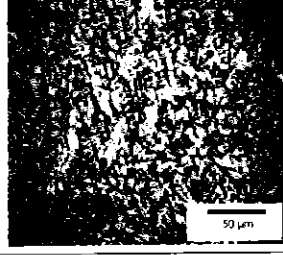
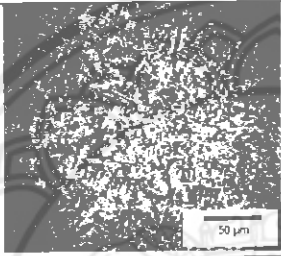
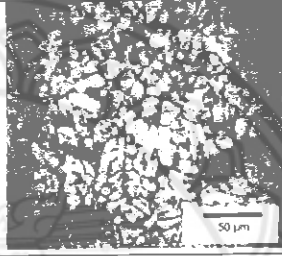
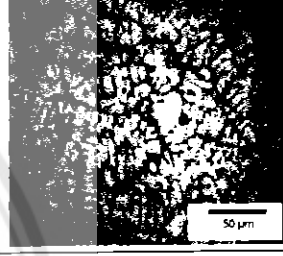
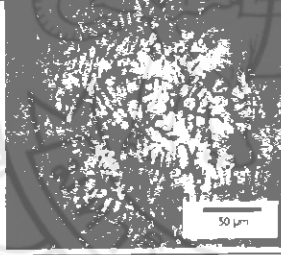
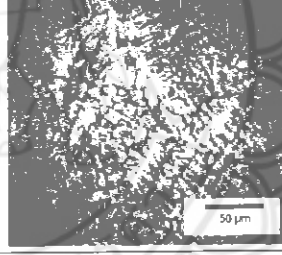
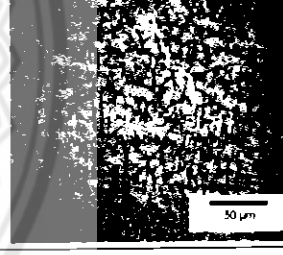
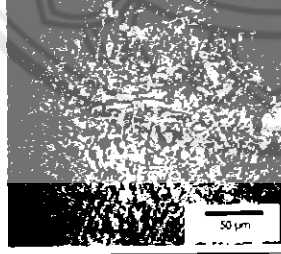
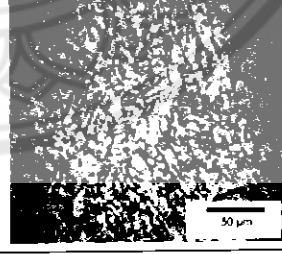

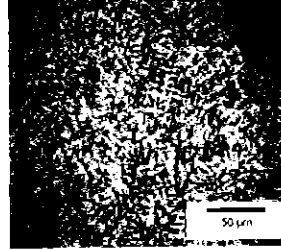

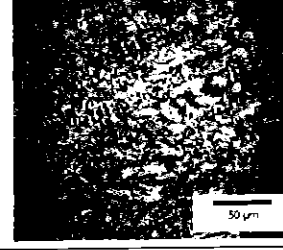
ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			

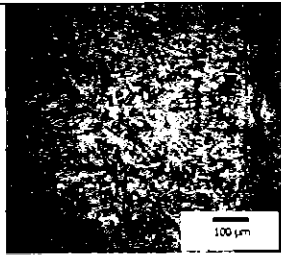
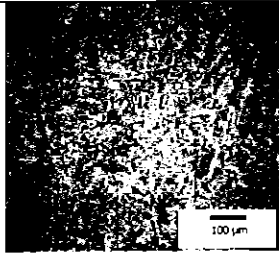
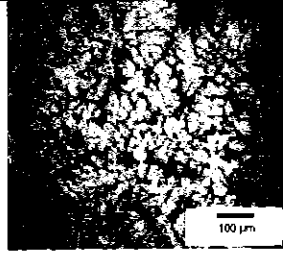
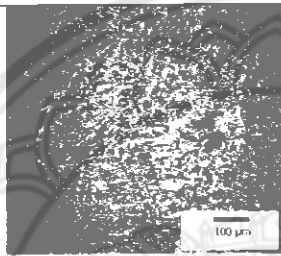
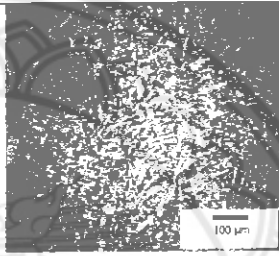
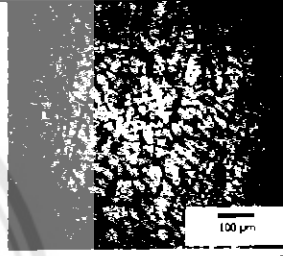
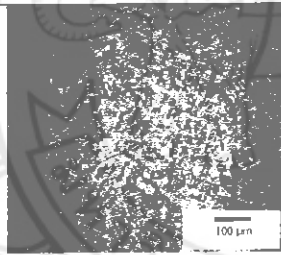
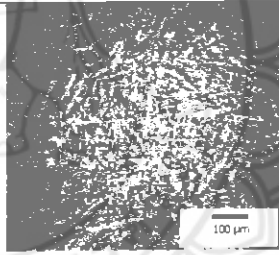
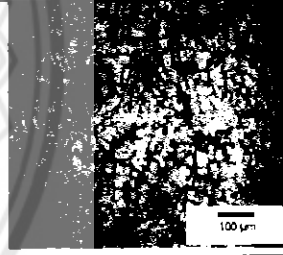
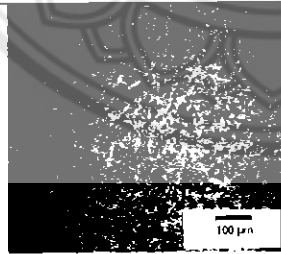
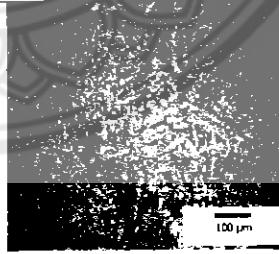
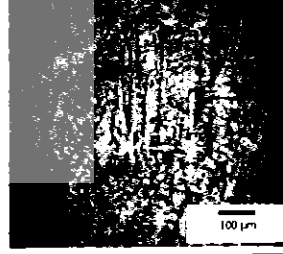
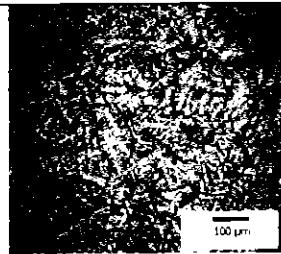
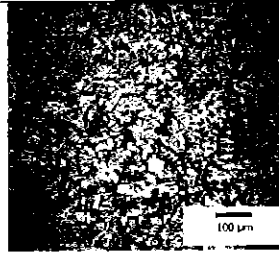
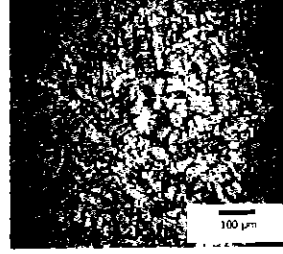
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			

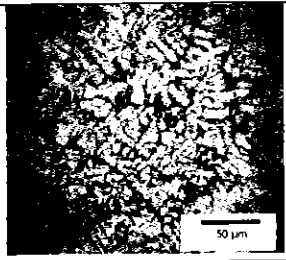
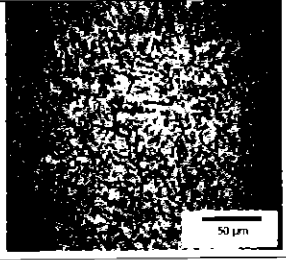
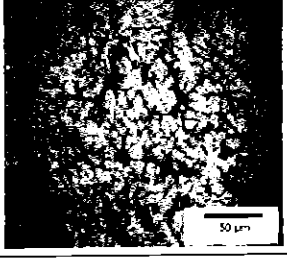
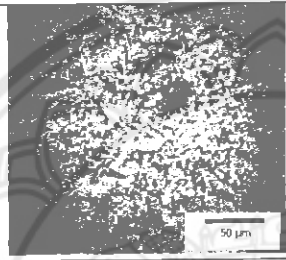
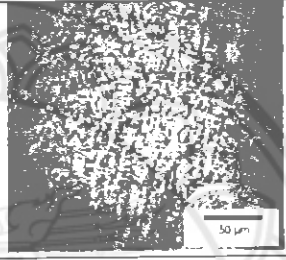
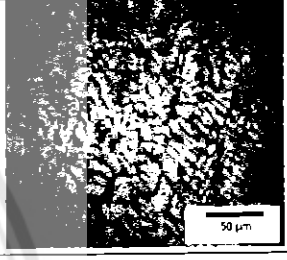
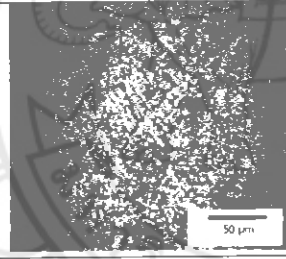
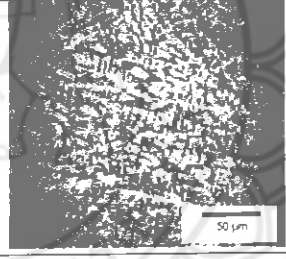
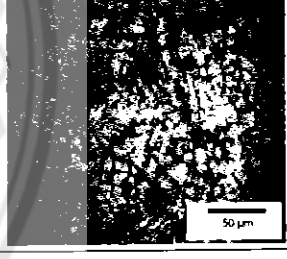
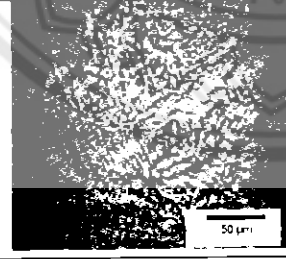
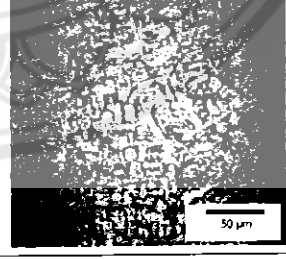
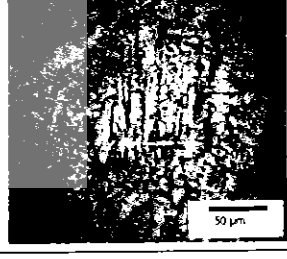
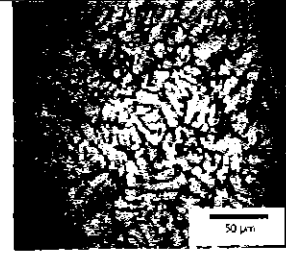
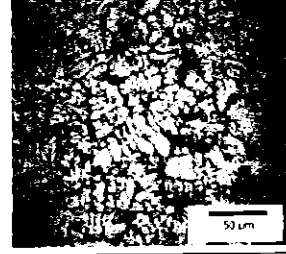
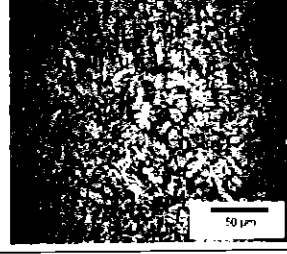
ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			

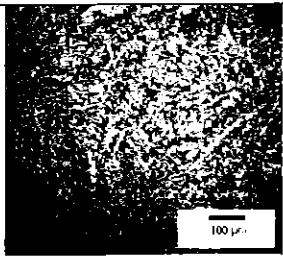
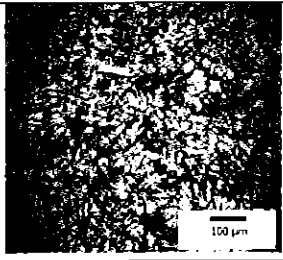
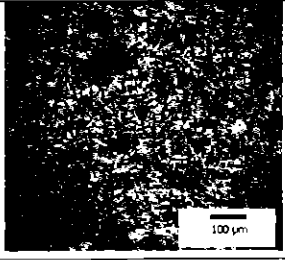
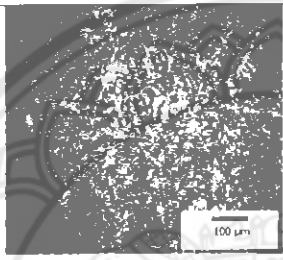
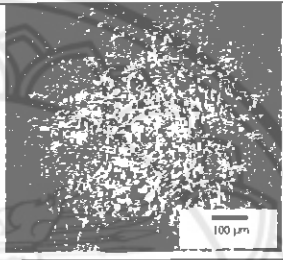
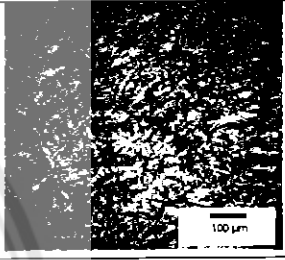
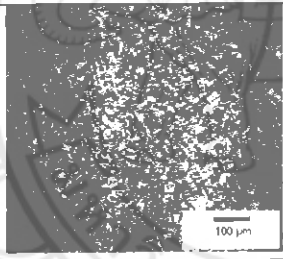
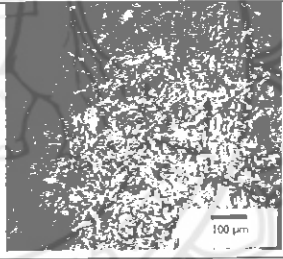
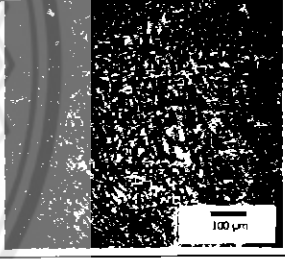
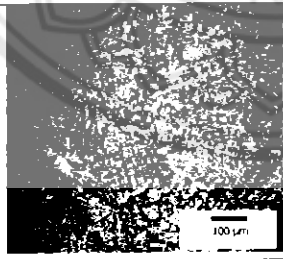
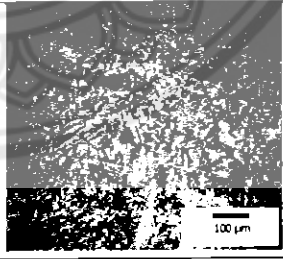
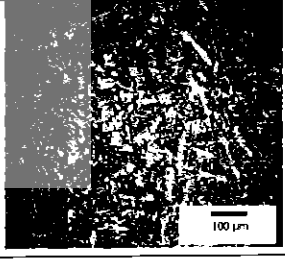
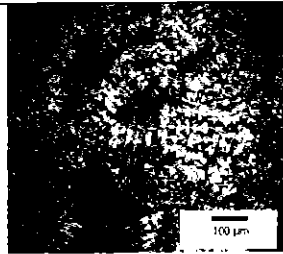
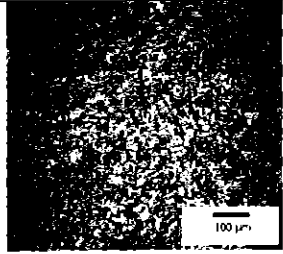
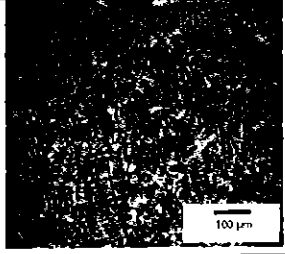
ตารางที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			

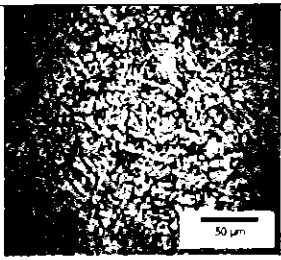
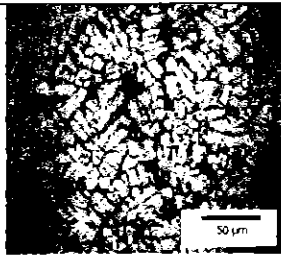
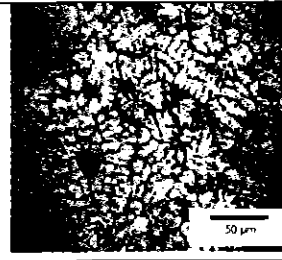
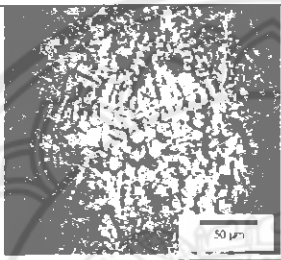
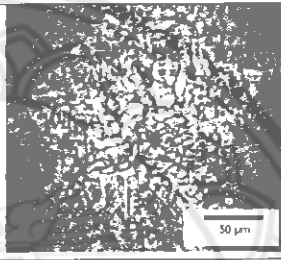
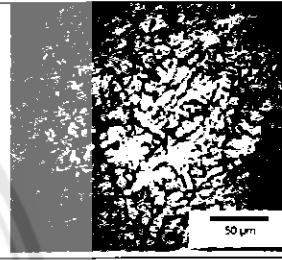
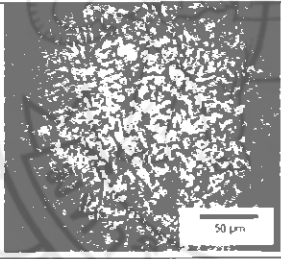
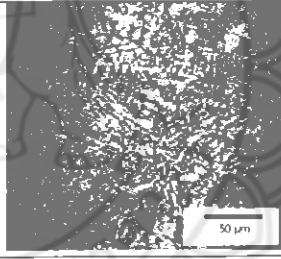
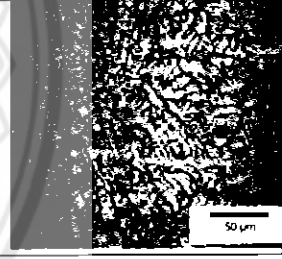
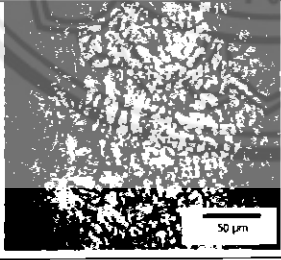
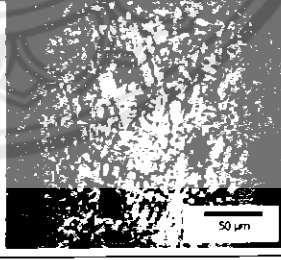
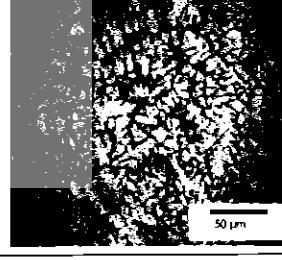
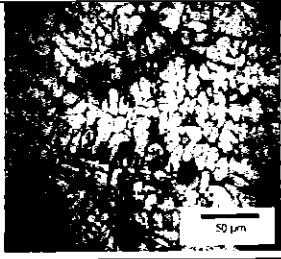
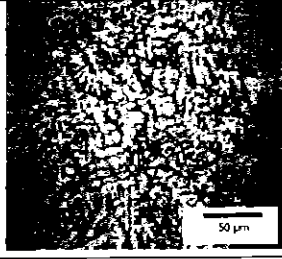

ตารางที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			

ตารางที่ ก.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			

ตารางที่ ก.8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตำแหน่งที่	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ตำแหน่งที่ 1			
ตำแหน่งที่ 2			
ตำแหน่งที่ 3			
ตำแหน่งที่ 4			
ตำแหน่งที่ 5			



ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อใช้ปริมาณของอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ปริมาณอะลูมินา	ตำแหน่ง	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)	ค่าความแข็งทั้งชิ้นงาน (HB)
ร้อยละ 0.0	1	111.841	103.682	105.645	107.056	108.783
	2	107.659	120.886	105.645	111.397	
	3	103.682	118.535	103.682	108.633	
	4	107.659	107.659	101.766	105.695	
	5	109.723	111.841	111.841	111.135	
ร้อยละ 0.25	1	116.245	109.723	111.841	112.603	113.046
	2	109.723	114.015	111.841	111.860	
	3	114.015	111.841	111.841	112.566	
	4	107.659	118.535	114.015	113.403	
	5	111.841	118.535	114.015	114.797	
ร้อยละ 0.5	1	111.841	105.645	118.535	112.007	114.627
	2	111.841	118.535	120.886	117.087	
	3	107.659	120.886	109.723	112.756	
	4	125.781	111.841	111.841	116.488	
	5	114.015	111.841	118.535	114.797	
ร้อยละ 1.0	1	114.015	120.886	125.781	120.227	117.630
	2	107.659	120.886	114.015	114.187	
	3	120.886	125.781	116.245	120.971	
	4	120.886	118.535	109.723	116.381	
	5	111.841	123.300	114.015	116.385	



ภาคผนวก ค

พื้นที่อนุภาคอะลูมินาในชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356
และพื้นที่อนุภาคอะลูมินา

ตารางที่ ค.1 พื้นที่อะลูมินาในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทอหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวรเมื่อเติมปริมาณของอะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.25, 0.50, และ 1.0 โดยน้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

พื้นที่อนุภาคอะลูมินาในชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 (μm^2)					
0.25		0.5		1.0	
622.029	338.411	408.685	448.122	90.978	225.245
257.781	585.648	339.962	360.788	665.608	503.307
871.793	110.477	412.068	322.783	683.44	646.347
520.907	619.802	105.163	80.695	493.028	462.439
463.146	309.01	129.372	100.479	315.755	2097.171
270.4	173.438	257.445	526.863	314.323	235.839
147.452	167.2	98.787	204.421	472.33	305.427
146.858		128.723	425.734	344.779	882.828
576.295		332.283	355.841	124.558	175.058
472.203		33.97	164.775	417.924	132.105
172.696		51.932	79.264	401.005	349.334
174.922		241.305	447.73	508.12	377.318
103.053		212.174	212.153	249.505	468.555
173.141		74.189	357.661	816.843	259.789
117.902		424.673	96.054	1244.271	1036.416
289.856		247.942	46.725	806.436	296.1
91.768		299.223	162.954	515.411	2350.827
79.888		181.306		375.495	178.57
280.5		754.503		399.441	369.247
877.583		342.956		357.924	392.805
194.672		93.109		329.809	
290.747		43.081		170.112	
พื้นที่อนุภาคเฉลี่ยรวม $364.640 \mu m^2$					

ตารางที่ ค.2 พื้นที่อนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 1 ไมโครเมตร

พื้นที่อนุภาคอะลูมินา (μm^2)				
0.167	0.095	0.13	0.15	0.151
0.247	0.197	0.124	0.24	0.243
0.304	0.626	0.166	0.251	0.23
0.205	0.405	0.22	0.151	0.213
0.255	0.098	0.167	0.214	0.285
เฉลี่ย $0.221\mu\text{m}^2$				

