



การผลิตวัสดุเชิงประกอบ อะลูมิเนียมผสม/ซิลิคอนคาร์ไบด์

ด้วยกระบวนการกวนหล่อ

FABRICATION OF ALUMINIUM ALLOY/SILICON CARBIDE
COMPOSITE VIA STIR CASTING PROCESS

นายพิทวัส	ทุ่งโพธิ์แดง	รหัส 52363424
นายอภิชาติ	อภิวังค์	รหัส 52363608
นางสาวอรสา	สิงห์บัวขาว	รหัส 52363615

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
 วันที่รับ.....ศ.ศ. 2555.....
 เลขทะเบียน..... 163 22724
 เลขเรียกหนังสือ..... 75.
 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พ 672 9

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
 ปีการศึกษา 2555



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การผลิตวัสดุเชิงประกอบ อะลูมิเนียมผสม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วย
กระบวนการกวนหล่อ

ผู้ดำเนินโครงการ นายพิทวัส พุ่งโพธิ์แดง รหัส 52363424
นายอภิชาติ อภิวงศ์ รหัส 52363608
นางสาวอรสา สิงห์บัวขาว รหัส 52363615

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2555

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันส์มฤทธิ)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การผลิตวัสดุเชิงประกอบ อะลูมิเนียมผสม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยกระบวนการทวนหล่อ		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายพิทวัส	ทุงโพธิแดง	รหัส 52363424
	นายอภิชาติ	อภิวงค์	รหัส 52363608
	นางสาวอรสา	สิงห์บัวขาว	รหัส 52363615
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2555		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทวนหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ความเร็วในการทวน 300 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในการเท 680 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ถูกล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) โดยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะเป็นเดรนไครท์ และยังพบหลุมที่มีการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ รูพรุน ตามการเพิ่มของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าที่ปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มีปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในเนื้อพื้คิดเป็นสัดส่วนพื้นที่ร้อยละ 0.26, 0.47 และ 0.63 ตามลำดับ ความแข็งพบว่าในชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักมีค่าความแข็ง 106.50, 110.95, 112.33 และ 117.28 HB ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความอนุเคราะห์อย่างมากของบุคคลหลายท่าน คณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณบุคคลผู้มีพระคุณ โดยเฉพาะอาจารย์ทศพล ตีร์จุริภาพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำดีๆ รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนดูแลติดตามโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอนโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างรมกฤต แสงม่วง ครูช่างธวัชชัย ชูลบุตร และครูช่างอิสรี วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้งานเครื่องมือต่างๆ ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัษณเรศวร ที่ให้ความรู้ ให้ประสบการณ์ และอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดีของสังคม

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัษณเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถดำเนินโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจเสมอมา
สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การดูแลตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จ
การศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายพิทวัส ทุ่งโพธิ์แดง

นายอภิชาติ อภิวงค์

นางสาวอรสา สิงห์บัวขาว

มีนาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นของวัสดุเชิงประกอบ	4
2.2 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	6
2.3 วัสดุประกอบเนื้อพื้นโลหะ	8
2.4 อันตรภาค	10
2.5 ภาวะการเปื่อย	10
2.6 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม	13
2.7 กระบวนการหล่อโลหะแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting)	20
2.8 การเพิ่มความแข็งแรงให้โลหะ (Strengthening Mechanisms)	21
2.9 การกวนหล่อ	23
2.10 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	25
2.12 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Hardness Test).....	26
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการโครงงาน.....	32
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินการโครงงาน.....	33
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์.....	33
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการโครงงาน.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	38
4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	38
4.2 อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	39
4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์.....	41
4.4 ความแข็ง.....	45
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 บทสรุป.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	47
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไข.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก ก.....	52
ภาคผนวก ข.....	61
ประวัติผู้ดำเนินการโครงการ.....	63

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ	1
2.1 สมบัติของวัสดุ เซรามิก พอลิเมอร์ และโลหะ	9
2.2 สมบัติอะลูมิเนียม	14
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด A356 โดยทั่วไป	33
4.1 ผลการวัดพื้นที่ภาพฉาย (Projected Area) และค่า D_A ของอนุภาค SiC	41
ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	53
ก.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	55
ก.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	57
ก.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก	59
ข.1 ค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมผสมส่วนเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 0 ที่ผ่านกระบวนการทวนหล่อ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 วินาที ที่อุณหภูมิ เท 680 องศาเซลเซียส ด้วยแบบหล่อถาวร	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเนื้อและลักษณะของส่วนเสริมแรง...8
2.2	ลักษณะของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงในรูปแบบต่างๆ.....8
2.3	แสดงสมบัติการเปียกและมุมสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง.....11
2.4	การแบ่งกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม.....13
2.5	แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน.....15
2.6	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก.....16
2.7	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก.....17
2.8	เฟสของ Al_5FeSi ที่มีลักษณะเป็นเข็ม.....18
2.9	เฟสของ $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ ที่มีลักษณะโค้งมนขึ้นทำให้ช่วยลดผลเสียจากการมีเหล็กปนเปื้อนได้.....18
2.10	การเกิดดิสโลเคชันรอบๆ อนุภาค.....23
2.11	กล้องจุลทรรศน์แสง.....24
2.12	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....25
2.13	วิธีการวัดความแข็งแบบบริเนล.....27
2.14	การแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล.....28
3.1	ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....32
3.2	แม่พิมพ์ถาวร.....35
3.3	การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร.....35
3.4	แสดงจุดที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง.....36
4.1	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....38
4.2	รูพรุนที่พบในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....39
4.3	ลักษณะของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....40
4.4	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....42
4.5	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก.....43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	44
4.7	ค่าร้อยละของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สามารถผสมเข้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	45
4.8	ค่าความแข็งที่ผ่านกระบวนการทวนหล่อเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 0, 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก.....	46



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดในกลุ่มของโลหะเบา (Light Metal) เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรงที่สูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน ส่วนประกอบในอุตสาหกรรมเคมี ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ในปัจจุบันการพัฒนากระบวนการผลิตของอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสม มีจุดประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงคุณภาพ และลดต้นทุนในการผลิต เพื่อให้สอดคล้องกับการแข่งขันทางการตลาด และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างครบถ้วน

ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสม ให้เหมาะกับประเภทของอุตสาหกรรมขึ้นมาหนึ่งชนิด นั่นคือ วัสดุเชิงประกอบ เนื้อพื้นอะลูมิเนียม (Aluminium Matrix Composite) ซึ่งเป็นการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมมาผสมเข้าด้วยกันกับวัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติเฉพาะตัว

ในโครงการนี้ได้เลือกใช้อัลูมิเนียมเกรดเก่ามาเป็นเนื้อพื้น และใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งคาดว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะให้สมบัติเด่นในเรื่องสมบัติทางกลที่ดีขึ้น มีความแข็งแรงสูงทนทานต่อการกัดกร่อน ในการผลิตจะใช้กระบวนการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ในสถานะของเหลวแล้วเทลงในแบบถาวร (Permanent Mold Casting) โดยใช้อัตราส่วนร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นมา ในศึกษานี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการนำอัลูมิเนียมเกรดเก่ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตวัสดุเชิงประกอบสำหรับภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ และยังเป็นความรู้พื้นฐานของการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการหล่อ

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อ โดยใช้แบบหล่อถาวร เมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ต่างกัน

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์

1.3.2 โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทวนหล่อ โดยใช้แบบหล่อถาวร เมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ต่างกัน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทวนหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวร เมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ต่างกัน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการงาน

1.5.1 อุนทภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลวคือ 680 องศาเซลเซียส

1.5.2 ใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเท่ากับ 100-150 ไมโครเมตร

1.5.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมหล่อแม็กกับซิลิคอนคาร์ไบด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของอะลูมิเนียม

1.5.4 วิธีการหล่อที่ใช้ในการทดลอง คือ การทวนหล่อ ความเร็วในการทวน 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที แล้วเทในแบบหล่อถาวร

1.5.5 ใช้แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ทำจากเหล็กกล้า โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาวของชิ้นงาน 150 มิลลิเมตร

1.5.6 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

1.5.7 วัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tests)

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการงาน

ตึกภาควิชาอุตสาหการ และอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการงาน

กรกฎาคม 2555 – กุมภาพันธ์ 2556

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา							
	พ.ศ. 2555						พ.ศ. 2556	
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.8.1 วางแผนและกำหนดขอบเขตโครงการ	←→							
1.8.2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกวนหล่อโดยแบบหล่อถาวร	←→	→						
1.8.3 ศึกษารวบรวมเนื้อหาเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์	←→	→						
1.8.4 จัดทำรายงานบทที่ 1-3	←→	→						
1.8.5 ทำการหล่อชิ้นงานโดยใช้ร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิโคนคาร์ไบด์ที่ 0, 1, 2 และ 3		←→	→					
1.8.6 ตรวจสอบรายละเอียดของการทดลองเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงาน				←→	→			
1.8.7 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง						←→	→	
1.8.8 จัดทำรูปเล่มโครงการ						←→	→	

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ความรู้เบื้องต้นของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติของวัสดุรวมที่ดีขึ้นกว่าวัสดุเดิม ดังนั้นการทำนาย หรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก และเป็นเฟสต่อเนื่องที่เรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) คือ ส่วนประกอบหลักของวัสดุเชิงประกอบ โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงที่น้อยกว่าส่วนเสริมแรง เนื้อพื้นจะเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง และปกคลุมส่วนที่เป็นตัวเสริมแรงจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เมื่อวัสดุได้รับการกระทบจะทำส่งถ่ายแรงจากเนื้อพื้นไปยังส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าเป็นผลให้เกิดการรับภาระได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุตั้งเดิม ส่วนวัสดุที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อพื้นนั้นเรียกว่า ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) เป็นส่วนที่ช่วยให้สมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงกว่าเนื้อพื้น

วัสดุเชิงประกอบสามารถออกแบบให้เป็นไปตามความต้องการได้ โดยปรับเปลี่ยนวัสดุเริ่มต้นที่ใช้ การพัฒนาอย่างเหมาะสมทำให้สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบให้มีรูปร่างที่ต้องการได้ ทำให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบยุคใหม่ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานทางวิศวกรรม ซึ่งมีสมบัติของวัสดุที่ตรงตามการใช้งานมากยิ่งขึ้น เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และงานด้านอวกาศ วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

2.1.1 วัสดุ เนื้อพื้น

คือ วัสดุที่มีปริมาณมากในวัสดุเชิงประกอบ มีหน้าที่ห่อหุ้ม หรือยึดจับวัสดุเสริมแรงให้ฝังตัวอยู่ได้ และมักมีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุเสริมแรง สมบัติที่ดีของวัสดุเนื้อพื้น คือ

2.1.1.1 ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุเสริมแรงที่อยู่ระหว่างการขึ้นรูป หรือระหว่างการเผาผนึก (Sintering) เพราะถ้าเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น จะทำให้สมบัติของวัสดุเนื้อพื้น และวัสดุเสริมแรงเปลี่ยนไป เพราะฉะนั้นก่อน และหลังการขึ้นรูป หรือการเผาผนึก วัสดุเนื้อพื้นกับวัสดุเสริมแรงควรมีรูปร่างเหมือนกัน ยกเว้นบริเวณอันตรภาคที่จะมีการเปลี่ยนแปลง

2.1.1.2 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือรูปร่างของวัสดุเสริมแรง เช่น วัสดุเนื้อพื้นต้องไม่ทำให้วัสดุเสริมแรงเกิดการแตกหรือหักได้ง่าย วัสดุเนื้อพื้นควรมีความยืดหยุ่นพอให้วัสดุเสริมแรงเคลื่อนที่หรือขยับตัวได้บ้าง

2.1.1.3 วัสดุเนื้อพื้นควรมีสถานะทางเคมีที่เสถียร (Chemically Stable) ไม่เปลี่ยนแปลงสถานะ หรือโครงสร้างง่าย ๆ

2.1.1.4 สามารถที่จะห่อหุ้มวัสดุเสริมแรงได้ กล่าวคือ วัสดุเนื้อพื้นยอมให้วัสดุเสริมแรงเข้าไปฝังตัว หรือกระจายตัวอยู่ได้โดยไม่หลุด

2.1.1.5 มีความต้านทานการเกิดความล้า (Fatigue), ความคืบ (Creep) และทนแรงกระแทก (Impact) ได้ดี ถ้าวัสดุเนื้อพื้นทนแรงกระแทกได้ไม่ดี วัสดุเนื้อพื้นจะเกิดรอยแตก และจะวิ่งไปชนวัสดุเสริมแรงที่ขวางอยู่ และหากถ้าวัสดุเสริมแรงมีความแข็งแรงกว่าแรงกระแทก ก็จะทำให้ไม่เกิดความเสียหายแก่วัสดุเสริมแรง

2.1.1.6 มีความเหนียวสูง (Ductility) ความเหนียว คือ มีความสามารถในการต้านทานรอย แตกร้าวของวัสดุ ในทางเซรามิกวัสดุเนื้อพื้นส่วนใหญ่จะมีสมบัติที่เปราะ ยกเว้นเซรามิกที่มีความเหนียว ได้แก่ เซอร์โคเนีย (ZrO_2)

2.1.1.7 ต้องไม่มีการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ได้ง่าย เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในได้

2.1.1.8 สามารถเข้ากันได้ดีกับวัสดุเสริมแรง ทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรง

2.1.1.9 ไม่เกิดการระเหยได้ง่าย (Volatilize) (จิตติ, 2551)

2.1.2 วัสดุเสริมแรง

คือ วัสดุที่มีปริมาณน้อยในวัสดุเชิงประกอบ มีสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุเนื้อพื้น และมีสมบัติที่ดีกว่า ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเนื้อพื้นมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยจะอยู่ในลักษณะกระจายตัว หรือฝังตัว อยู่ในวัสดุเนื้อพื้น รวมทั้งการประกบแบบอัดซ้อนกับวัสดุเนื้อพื้น สมบัติที่ดีของวัสดุเสริมแรง คือ

2.1.2.1 ความสามารถในการเข้ากันได้กับวัสดุเนื้อพื้น เช่น ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเคมี ความสามารถในการทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรง

2.1.2.2 เป็นตัวช่วยเสริมแรงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อพื้น โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุเสริมแรงจะมีค่าความแข็ง (Hardness) และความแกร่ง (Stiffness) มากกว่าวัสดุเนื้อพื้น

2.1.2.3 มีน้ำหนักเบา (Light Weight) เมื่อนำมาใช้ในวัสดุเชิงประกอบจะได้สมบัติเชิงกลอยู่ในรูปแบบสมบัติเฉพาะ (Specific Properties) โดยเป็นสมบัติเชิงกลต่อความหนาแน่น

2.1.2.4 มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion)

2.1.2.5 มีความสามารถในการยืดหยุ่น (Flexibility) สูง

2.1.2.6 มีความแข็งแรง (Toughness) สูง

2.1.2.7 มีความแข็งแรง (Strength) สูง (จิตติ, 2551)

2.2 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งตามองค์ประกอบ และลักษณะการเกิดได้ ดังนี้

2.2.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบแบ่งตามเนื้อพื้นได้เป็น 3 ประเภท คือ แสดงรูปที่ 2.1

2.2.1.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite, PMC) พอลิเมอร์เป็นสารอินทรีย์ที่มีธาตุออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) เป็นองค์ประกอบหลัก เชื่อมโครงสร้างด้วยพันธะโคเวเลนต์แบ่งออกเป็น เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซต และยาง ซึ่งมีสมบัติดังนี้ มีความแข็งแรงที่ต่ำ มีน้ำหนักเบา เกิดขึ้นจากธรรมชาติ หรือจากการสังเคราะห์ได้มีสมบัติที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น ไม่ทนอุณหภูมิสูง วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นพอลิเมอร์ มีส่วนเสริมแรงที่เป็นได้ทั้งพอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก โดยที่เส้นใยเสริมแรงได้ถูกเลือกให้เพิ่มสมบัติบางประการให้กับเนื้อพื้น เช่น เพิ่มมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) เพิ่มความแข็งแรง (Tensile Strength) เพิ่มความเค้นจุดคราก (Yield Strength, σ_y) และความต้านทานความคืบ (Creep Resistance) เป็นต้น

2.1.1.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix Composite, MMC) โลหะเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งแยกออกได้เป็นโลหะในกลุ่มเหล็ก และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโลหะ ทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสมบัติดังนี้ นำความร้อน และไฟฟ้าได้ดี ความแข็งแรงสูง มีกระบวนการขึ้นรูปที่ง่าย แต่ใช้อุณหภูมิที่สูงมากในกระบวนการขึ้นรูป ส่วนมากส่วนเสริมแรงเป็นโลหะ หรือเซรามิก เพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Tensile Strength) และความต้านทานความคืบ (Creep Resistance) ให้กับเนื้อพื้นที่เป็นโลหะ

2.1.1.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic Matrix Composite, CMC) เซรามิกเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นฉนวนทางความร้อน และไฟฟ้าได้ดี มีความแข็งทนทานต่อแรงขีดข่วนที่ดี แต่เปราะไม่สามารถทนแรงกระแทกได้ (สถาบันพัฒนาวิชาชีพ สวทช., 2539)

2.2.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบแบ่งตามส่วนเสริมแรงได้เป็น 3 ประเภท คือ แสดง รูปที่ 2.2

2.2.2.1 ส่วนเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous Composite)

วัสดุที่ใช้เป็นเส้นใยมีหลายรูปแบบดังนี้

ก. วิสเกอร์ (Whisker) คือ ผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ๆ มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูง และมีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก ยกตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ เป็นต้น

ข. ไฟเบอร์ (Fibre) คือ เส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึก หรือเป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์ หรือเซรามิก ยกตัวอย่างเช่น ออรามิด (Aramid) แก้ว คาร์บอน และไบรอนออกไซด์ เป็นต้น

ค. ลวดเล็ก (Fine Wire) โดยทั่วไปแล้วลวดเล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์ และไฟเบอร์ และมักจะหมายถึงโลหะ อย่างเช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเทน ยกตัวอย่างการใช้งาน เช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้เสริมแรงในยางรถยนต์ หรือลวดเสริมแรงในตัวของจรวด (rocket casing) เป็นต้น

2.2.2.2 ส่วนเสริมแรงที่มีลักษณะอนุภาค (Particulate Composites)

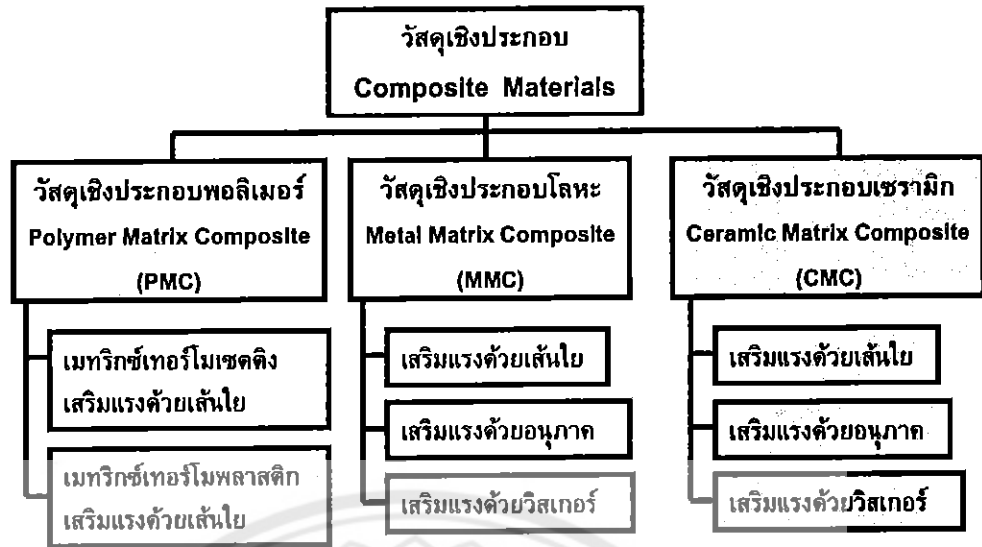
คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆ กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ที่มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large Particle Composite) และวัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค

ก. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ค้ำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ในที่นี้คือ เรามองภาพรวมของอนุภาค ไม่ใช่มองในระดับอะตอมหรือโมเลกุล อย่างไรก็ตาม เพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่จนเกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้น รูปร่างของอนุภาคอาจเป็นได้หลายแบบแต่ควรมีลักษณะที่สมมาตร คือ มีขนาดเท่ากันในทุกๆ ทิศทาง นอกจากนี้ ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้นด้วย

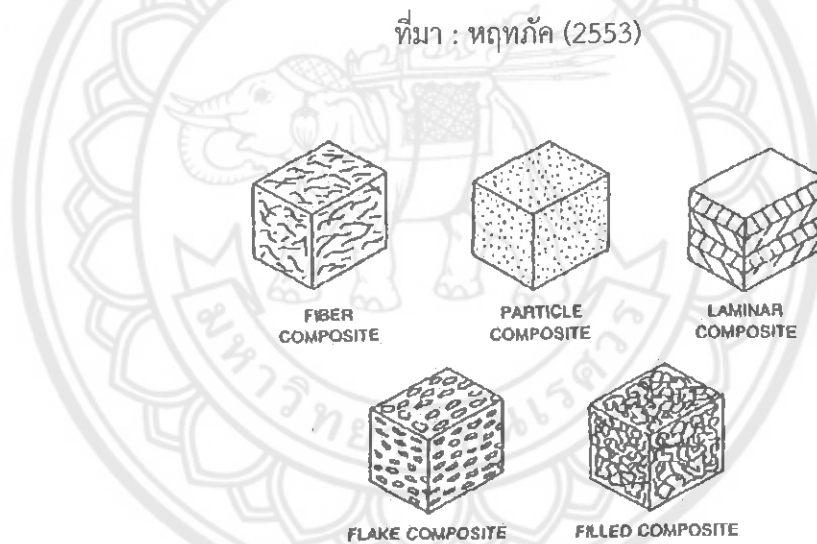
ข. วัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาคใน วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคประเภทนี้ อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะมีขนาดเล็กกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่มาก โดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตร อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเนื้อพื้น (Particle Matrix Interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอม หรือโมเลกุล กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงนี้จะคล้ายกับ กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบประเภทนี้ เช่น นิกเกิล ทีดี (TD Nickel) คือ นิกเกิลผสมที่เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โดยการเติมอนุภาคของทอเรีย (Thoria, ThO_2) ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลงไปกระจายอยู่ในเนื้อพื้นของนิกเกิล

2.2.2.3 ส่วนเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นชั้น (Laminar Composites)

ประกอบด้วยเนื้อพื้นและส่วนเสริมแรงซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ สลับกันไป (สุภาสินี, 2554)



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเนื้อพื้น และลักษณะของ ส่วนเสริมแรง



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงในรูปแบบต่างๆ

ที่มา : ณรงค์ศักดิ์ (2553)

2.3 วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นโลหะ

วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นโลหะได้พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียม ที่ต้องการให้มีสมบัติพิเศษสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน ส่วนเสริมแรงอาจอยู่ในลักษณะของอนุภาคที่เป็นเส้นใย หรือวิสเกอร์ก็ได้ นอกจากนี้ ส่วนเสริมแรงสำหรับโลหะจะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการขึ้นรูป และส่วนเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเนื้อพื้นโลหะ จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้ส่วนเสริมแรงอนินทรีย์ และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เป็นส่วน

เสริมแรงให้กับเนื้อพื้นโลหะได้ ส่วนเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นส่วนเสริมแรงเซรามิก หรือส่วนเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น การเสริมแรงเป็นการทำให้เนื้อพื้นของโลหะมีความทนทานต่อความล้าสูงขึ้นมาก และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อีกทั้งความหนาแน่นของส่วนเสริมแรงที่น้อยกว่าโลหะ ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลงรวมถึงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient Temperature Expansion, CTE) ลดลงด้วยเช่นกัน เพราะส่วนเสริมแรงเป็นเซรามิก จึงมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่าโลหะ ส่วนกรณีที่ส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใยยาววัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีความแข็งแรงสูงขึ้นไปอีก โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ ส่วนเสริมแรงที่เติมเข้าไปจะเป็นการปรับปรุงสมบัติของเนื้อพื้นโลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก ซึ่งสมบัติของวัสดุ แสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุ เซรามิก พอลิเมอร์ และโลหะ

Materials	Density (Mg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Strength (Mpa)	Ductility (%)	Toughness K _{IC} (MPa m ^{1/2})	Specific modulus [(GPa)/(Mg/m ³)]	Specific strength [(M Pa)/(Mg/m ³)]
CERAMICS							
Alumina Al ₂ O ₃	3.87	382	332	0	4.9	99	86
Magnesia MgO	3.60	207	230	0	1.2	58	64
Silicon Nitride Si ₃ N ₄		166	210	0	4.0		
Zirconia ZrO ₂	5.92	170	900	0	8.6	29	152
β - Sialon	3.25	300	945	0	7.7	92	291
Glass - ceramic Silceram	2.90	121	174	0	2.1	42	60
METALS							
Aluminium	2.70	69	77	47		26	29
Aluminium -3%Zn- 0.7%Zr	2.83	72	325	18		25	115
Brass Cu-30%Zu	8.50	100	550	70		12	65
Nickel-20%Cr-15%Co	8.18	204	1200	26		25	147
Steel mild	7.86	210	460	35		27	59
Titanium-2.5%Sn	4.56	112	792	20		24	174
POLYMERS							
Epoxy	1.12	4	50	4	1.5	4	36
Melamine formaldehyde	1.50	9	70			6	47
Nylon 6.6	1.14	2	70	60		18	61
Polyetheretherketon	1.30	4	70			3	54
Polyetheretherketon	1.19	3	50	3	1.5	3	42
Polymethylmethacrylate	1.05	3	50	2	1.0	3	48
Polystyrene Polyvinylchloride rigid	1.70	3	60	15	4.0	2	35

ที่มา : R.D. Rawlings (2001)

2.4 อันตรภาค

พื้นที่รอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้า 2 ผิวหน้า หรือระหว่าง 2 วัสดุ เช่น ของแข็ง-ของแข็ง หรือของแข็ง-ของเหลว เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญต่อวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากอันตรภาคมีอยู่ในวัสดุเชิงประกอบเป็นพื้นที่มาก และโดยทั่วไปวัสดุเนื้อพื้น และวัสดุเสริมแรงจะมีค่าทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ที่ไม่สมดุลกัน เนื่องจากเป็นวัสดุคนละชนิดทำให้มีผลต่ออันตรภาค

2.4.1 ตัวอย่างของสาเหตุที่ทำให้เกิดอันตรภาค

2.4.1.1 สมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว

2.4.1.2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนไม่เท่ากัน

2.4.1.3 จำนวน และขนาดของอะตอมที่แตกต่างกัน

2.4.1.4 ปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

2.4.1.5 โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน

2.4.1.6 ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

2.4.2 ลักษณะการยึดติดกันของผลึกบริเวณอันตรภาค

2.4.2.1 Coherent เป็นการยึดติดกันระหว่างระนาบของแลตทิซ (Lattice Plane) อย่างต่อเนื่อง โดยที่แลตทิซไม่เกิดการแปรรูป (Deformation)

2.4.2.2 Semicoherent เป็นการยึดติดกันระหว่างระนาบของแลตทิซ (Lattice Plane) อย่างไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากเกิดการเสียรูปขึ้นบางส่วน

2.4.2.3 Incoherent ระนาบของแลตทิซไม่สามารถยึดติดกันได้ เนื่องจากอะตอมเกิดความไม่เป็นระเบียบ (จิตติ, 2551)

2.5 ภาวะการเปียก

คือ ความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งอาจจะเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล โดยระดับชั้นของภาวะการเปียกขึ้นกับความสมดุลระหว่าง แรงแอดฮีชัน และแรงโคฮีชัน

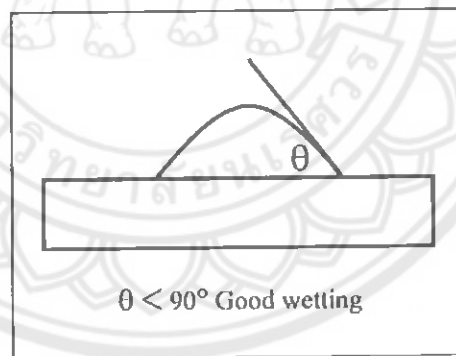
แรงแอดฮีชันระหว่างของเหลวและของแข็ง จะทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่วพื้นผิว ส่วนแรงโคฮีชันภายในของเหลวเองจะทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลม และไม่สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง

การทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีการเชื่อมประสาน และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน อาทิเช่น อุณหภูมิ เวลา สมบัติการเปียก (Wetting) มุมสัมผัส (Contact Angle, θ) รวมถึงพลังงานพื้นผิว (Surface Energy หรือ Interfacial Tensions) ซึ่งอุณหภูมิจะเป็นตัวกำหนดการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ สำหรับเวลานั้นหากมีการใช้เวลาในการเผาประสานนาน หรือเร็วจะบ่งบอกถึงสมบัติการเปียก และมุมสัมผัสของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้เป็นส่วนประกอบ จากการศึกษาสมบัติ

การเปียก และมุมสัมผัสระหว่างของเหลว และของแข็ง ปรากฏว่าของเหลวจะแสดงสมบัติการเปียกบนผิวของแข็งได้หลายลักษณะ แสดงรูปที่ 2.3 ก) จะแสดงถึงสมบัติการเปียกที่ดี (Good Wetting) ซึ่งมุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา ($\theta < 90$ องศา) สำหรับรูปที่ 2.3 ข) จะแสดงถึงสมบัติการเปียกผิวที่ไม่ดี (Poor wetting) ซึ่งมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา ($\theta > 90$ องศา) สำหรับรูปที่ 2.3 ค) จะแสดงถึงสมบัติการเปียกที่สมบูรณ์ (Complete Wetting) ทำให้วัสดุทั้ง 2 ชนิดเชื่อมประสานกันแน่น ซึ่งมุมสัมผัสจะเท่ากับ 0 องศา ($\theta = 0$ องศา) สำหรับรูปที่ 2.3 ง) จะแสดงพลังงานที่ผิวและมุมสัมผัสของวัสดุ ซึ่งมุมสัมผัสจะมาก หรือน้อย ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ผิวของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่สมดุล โดยพลังงานที่ผิวของทั้ง 3 สถานะของวัสดุจะสมดุลกันสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2.1)$$

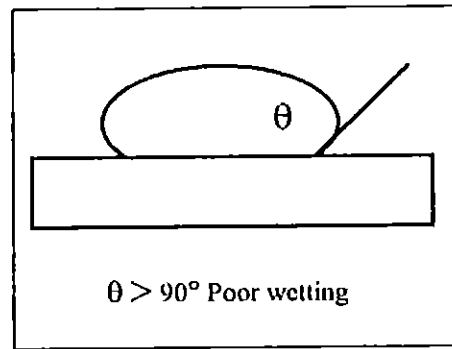
โดย γ_{sv} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็ง และแก๊ส (MJ/m^2)
 γ_{sl} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็ง และของเหลว (MJ/m^2)
 γ_{lv} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของเหลว และแก๊ส (MJ/m^2)
 θ คือ มุมสัมผัส (Degree)



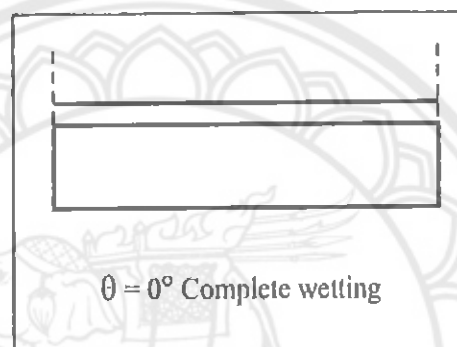
ก)

รูปที่ 2.3 สมบัติการเปียกและมุมสัมผัสระหว่างของเหลว และของแข็ง

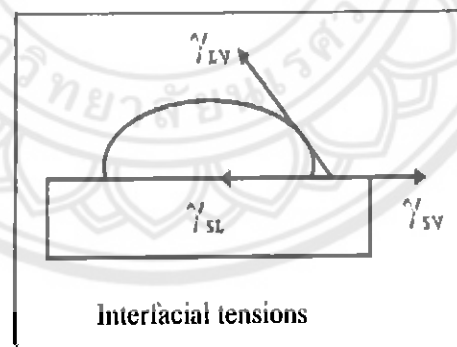
ก) สมบัติการเปียกที่ดีระหว่างของแข็ง และของเหลว



ข)



ค)



ง)

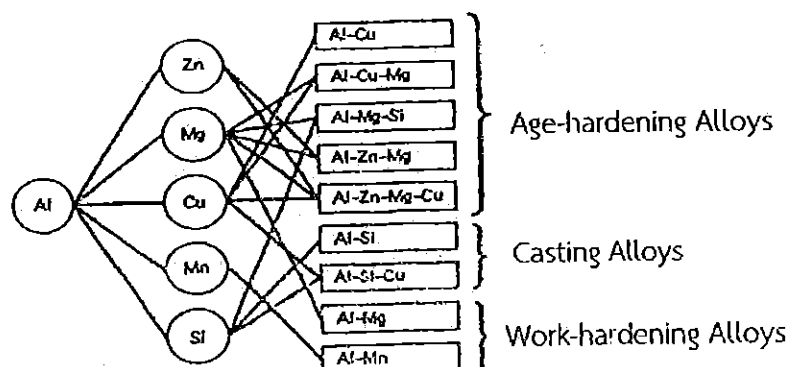
- รูปที่ 2.3 (ต่อ) สมบัติการเปียก และมุมสัมผัสระหว่างของเหลว และของแข็ง
- ข) สมบัติการเปียกที่ไม่ดีระหว่างของแข็ง และของเหลว
 - ค) สมบัติการเปียกที่ดีมากระหว่างของแข็ง และของเหลว
 - ง) พลังงานที่ผิว และมุมสัมผัสของวัสดุทั้ง 3 สถานะ
- ที่มา : สุธรรม (2542)

ปัญหาการเปื่อยของอนุภาค คือ เคมีพื้นผิว และแรงตึงผิวของน้ำโลหะหลอมเหลว ซึ่งต้องพิจารณาร่วมกับ คุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิว การปนเปื้อนบริเวณพื้นผิว หรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และออกไซด์ตามชั้นต่างๆ ในเบื้องต้นการเพิ่มความสามารถในการเปียก ทำได้โดยการเพิ่มพลังงานที่พื้นผิวของของแข็ง ลดแรงตึงผิวของของเหลว และลดพลังงานผิวประจันระหว่างของแข็ง และของเหลวในส่วนที่เป็นอินเทอร์เฟซระหว่างอนุภาค และเนื้อพื้นวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตโดยใช้น้ำโลหะหลอมเหลว สามารถสร้างพันธะได้ดีเยี่ยม กับอนุภาคเซรามิกบางชนิด เช่น Mg, Ca, Ti, หรือ Zr ซึ่งจะช่วยเพิ่มสมบัติการเปียก และยังใช้เป็นตัวช่วยในการเพิ่มสมบัติการเปียกของเซรามิกชนิดอื่นด้วย เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไมก้า วิธีการเพิ่มสมบัติการเปียกของอนุภาคเซรามิก ยังมีอีกหลากหลายวิธีการขึ้นอยู่กับชนิดของเซรามิกนั้นๆ สำหรับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์นั้น มีอีกวิธีหนึ่งซึ่งก็คือการผสมโซเดียมดีไฮเดรตเตตระโบเรต ลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลวด้วย (J. Hashim, 1999)

2.6 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม คือ ธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Al มีเลขอะตอมเท่ากับ 13 โดยอะลูมิเนียมเป็นโลหะหลักทรานซิชันที่มีความมันวาว อ่อน และดัดง่าย ในธรรมชาติอะลูมิเนียมจะพบอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์เป็นหลัก

โลหะผสมอะลูมิเนียมสำหรับงานหล่อมีการพัฒนามาจากระบบยูเทคติกของธาตุ 2 ธาตุ เช่น อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Aluminium-Silicon), อะลูมิเนียม-ทองแดง (Aluminium-Copper) และอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Aluminium-Magnesium) เป็นต้น แสดงรูปที่ 2.4 อย่างไรก็ตามโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่พัฒนามาจากระบบอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยอาจมีการเติมธาตุต่างๆ ลงไป เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น ทำให้มีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ทำให้เพิ่มความแข็งแรงด้วยการทำให้เกิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution Hardening) และทำให้เพิ่มความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Strength)



รูปที่ 2.4 การแบ่งกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ที่มา : David, J.R. (1993)

2.6.1 สมบัติเด่นของอะลูมิเนียม

มีหลายประการ คือ แสดงตารางที่ 2.2

2.6.1.1 เป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย (Nontoxic) และมีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหาร และท่อรองรับอาหาร

2.6.1.2 ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีดัชนีการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อนในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในโคมไพตา ไฟหน้ารถยนต์

2.6.1.3 มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ต่ำ โดยอะลูมิเนียมมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1 ส่วน 3 เท่าของเหล็ก

2.6.1.4 มีความเหนียวสูง อ่อนตัวสูง สามารถดัดแปลง และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย

2.6.1.5 มีความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Strength per weight ratio) สูง

2.6.1.6 ทนทานต่อการเกิดสนิม และการผุกร่อนในบรรยากาศทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดแก่ และด่างทั่วไป (ชาญวุฒิ, 2529)

2.6.1.7 อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน (German, 1994)

แต่เนื่องจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความแข็งต่ำ จึงทำให้ความต้านทานการสึกกร่อนของโลหะชนิดนี้ค่อนข้างต่ำ จึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งาน

อย่างไรก็ตาม การนำโลหะอะลูมิเนียมไปใช้งานในด้านต่างๆ นั้น ต้องคำนึงถึงคุณลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละด้าน ซึ่งโดยทั่วไปโลหะอะลูมิเนียมมีหลายเกรดขึ้นอยู่กับส่วนผสม จึงทำให้อะลูมิเนียมในแต่ละเกรดมีสมบัติที่แตกต่างกันไปด้วย

ตารางที่ 2.2 สมบัติของอะลูมิเนียม

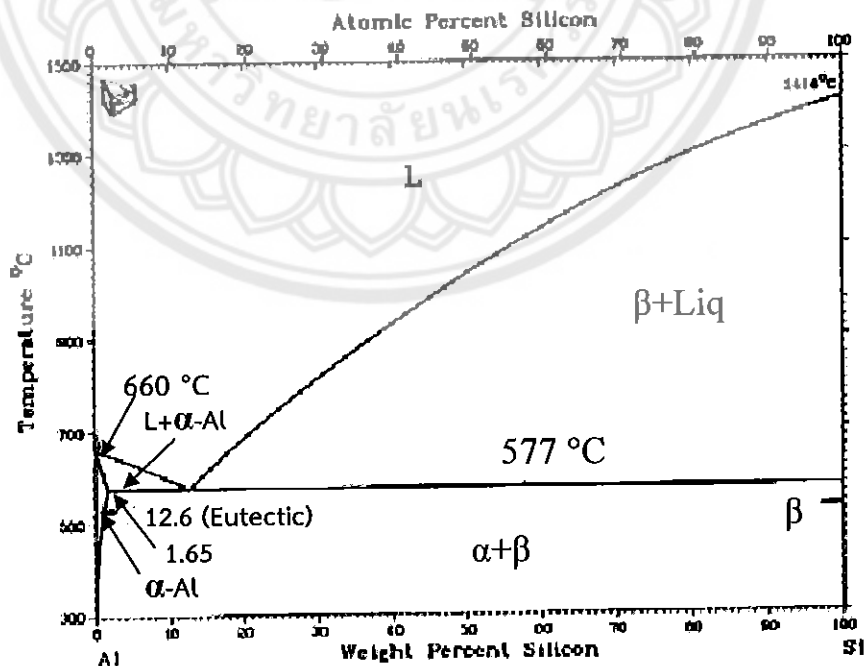
properties	Aluminium
Density, g/cm ³	2.7
Melting temperature, °C	580-660
Coefficient of thermal expansion, 10 ⁻⁶ / °K	23.4
Elastic modulus, GPa	69
UTS, MPa	90-400
Thermal conductivity, W/m-K	150-220

ที่มา : จิตติ (2551)

2.6.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

เนื่องจากซิลิคอนมีคุณลักษณะหลายประการที่แตกต่างกับอะลูมิเนียม โดยเฉพาะโครงสร้างระบบผลึก และจุดหลอมเหลว ดังนั้นการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนจึงมีขอบเขตจำกัดมาก โดยซิลิคอนจะละลายเป็นสารละลายของแข็งในอะลูมิเนียมได้สูงสุดร้อยละ 1.65 ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส ให้เฟส α (เฟส α คือ สารละลายของอะลูมิเนียมกับซิลิคอน) และปริมาณของซิลิคอนจะละลายในเฟส α ได้น้อยเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 544 องศาเซลเซียส จะเหลือปริมาณของซิลิคอนในเฟส α เพียงร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แสดงรูปที่ 2.5

จากแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงรูปที่ 2.5 โดยให้ปฏิกิริยาอุทกติกจากโลหะผสมหลอมเหลวร้อยละ 12.6 ซิลิคอนจะให้เฟส α ที่มีซิลิคอนละลายอยู่ 1.65 โดยน้ำหนัก และเฟส β ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่อาจจะบอกได้ว่าเป็นสารละลายของแข็งซิลิคอนกับอะลูมิเนียม หรือเป็นซิลิคอนบริสุทธิ์ เพราะจากเอกสารหลายเล่มจะเขียนเส้นแสดงขอบเขตของสารละลายอะลูมิเนียมในซิลิคอนไว้เป็นเส้นไขปลากซึ่งแสดงความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตาม เฟส β มีคุณสมบัติที่แข็ง และเปราะ ถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของเฟส β ขนาดใหญ่ในลักษณะต่อเนื่องมีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำ และขาดสมบัติด้านความเหนียว เนื่องจากเป็นโลหะผสมที่ให้ส่วนผสมยูทกติกที่จุดหลอมเหลวต่ำ (577 องศาเซลเซียส) ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีสมบัติทางด้านการหล่อที่ดี มีอัตราการหดตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในเกณฑ์ที่ดีพอสมควร แต่ด้านความแข็งแรง และความเหนียวจะไม่สูงเทียบเท่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง (มันส์, 2543)

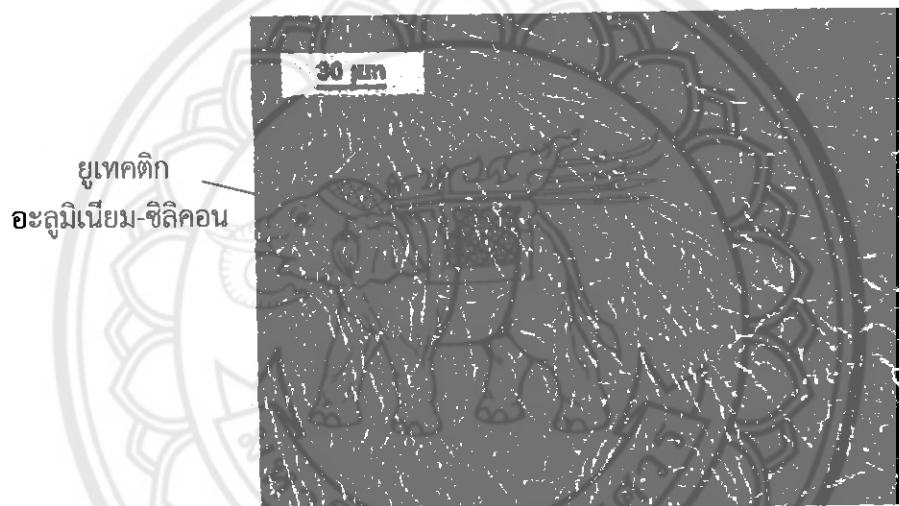


รูปที่ 2.5 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

ที่มา : Yougui Liao (2551)

2.6.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก

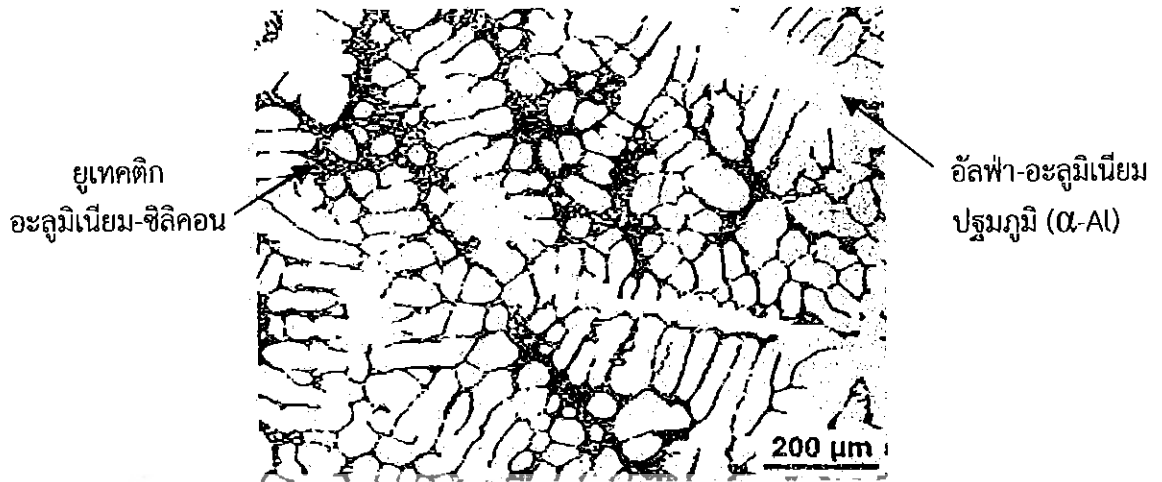
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีองค์ประกอบแบบยูเทคติก มีส่วนผสมของซิลิคอนร้อยละ 12.6 โดยน้ำหนัก โลหะผสมนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการตกตะกอนได้จึงต้องมีการเติมโลหะเจือปนอื่นๆ ลงไป เช่น การเติมธาตุแมกนีเซียม หรือทองแดง เพื่อให้สามารถปรับปรุงสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน โลหะผสมชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างของยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Aluminium-Silicon) ที่ค่อนข้างหยาบ แสดงรูปที่ 2.6 แต่สามารถปรับให้โครงสร้างละเอียดได้โดยการเติมธาตุโซเดียม หรือสตรอนเชียมในน้ำโลหะเพียงร้อยละ 0.01-0.015 โดยน้ำหนัก ส่งผลทำให้จุดยูเทคติกเลื่อนจากร้อยละ 12.6 โดยน้ำหนักไปเป็นซิลิคอนร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิคอนปฐมภูมิ และทำให้ซิลิคอนละเอียดขึ้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก
ที่มา : Hong-Min Guo (2009)

2.6.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทคติก มีส่วนผสมของซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 12.6 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary- α Aluminium) และโครงสร้างของยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงรูปที่ 2.7 เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีช่วงการแข็งตัวกว้าง จึงสามารถพบโพรงที่เกิดจากการหดตัวของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิกระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงานจึงทำให้สมบัติทางกลลดลง โลหะผสมไฮโปยูเทคติกที่มีธาตุผสมอื่นมากกว่า 2 ธาตุเป็นองค์ประกอบแต่โดยมากแล้วจะผสมทองแดง หรือแมกนีเซียมเข้าไป เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้ดีขึ้นด้วยการตกตะกอนได้



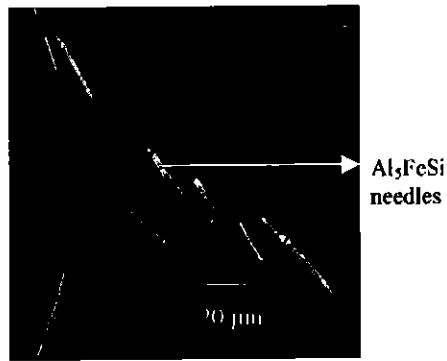
รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก

ที่มา : Hong-Min Gua (2009)

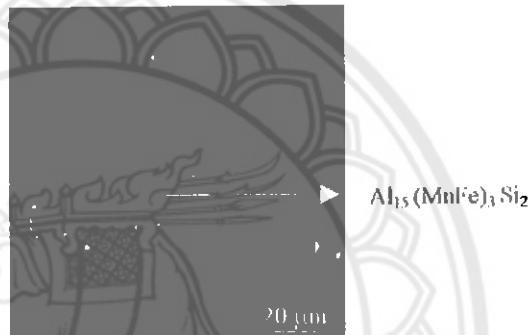
2.6.5 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีองค์ประกอบแบบไฮเปอร์ยูเทคติก มีส่วนผสมของซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 12.6 โดยน้ำหนัก โลหะอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติกมักทนต่อการเสียดสี และมีการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิน้อย อย่างไรก็ตาม สมบัติในการกลึงไสตัดคมักต่ำ และความเหนียวมักต่ำด้วย ดังนั้นหากต้องการให้มีสมบัติที่ดีขึ้นต้องปรับปรุงโครงสร้างทางโลหะวิทยาโดยการทำให้อนุภาคซิลิคอนละเอียดขึ้น และมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น โดยการทำการปรับเฟสหลักของซิลิคอน (Primary Silicon) ด้วยการเติมฟอสฟอรัส เทคนิคนี้เรียกว่า การปรับสภาพเฟส

ธาตุผสมอย่างเดียวกันอาจเป็นธาตุที่เป็นประโยชน์ และโทษสำหรับอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดที่แตกต่างกัน เช่น เหล็ก ซึ่งต้องควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต่ำมาก ในกรณีที่เป็นอะลูมิเนียมเกรดไฮโปยูเทคติก ซึ่งโดยทั่วไปต้องควบคุมไม่ให้เกินกว่าที่กำหนด ทั้งนี้อาจทำให้เกิดเฟสของ Al_5FeSi ที่มีรูปร่างเป็นเข็มแหลม และเปราะโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราการแข็งตัวที่ช้า แสดงรูปที่ 2.8 การที่เฟส Al_5FeSi มีความแข็งเปราะและมีรูปร่างที่แหลมนั้นส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกล ในบางครั้งจึงนิยมเติมแมงกานีสลงไปเพื่อให้เกิดเฟส $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ ที่มีลักษณะเป็นเฟสที่โค้งมนขึ้น แสดงรูปที่ 2.9 จึงส่งผลให้ช่วยลดผลเสียจากการสูญเสียความเหนียวเมื่ออะลูมิเนียมมีเหล็กมากเกินไปได้บ้าง อย่างไรก็ตาม ในกรณีของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก สามารถยอมให้เหล็กมีอยู่ในส่วนผสมมากกว่าปกติเพราะอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติกนิยมใช้ในงานหล่อแบบหล่อถาวร (Die Casting) โดยเฉพาะที่เป็นแบบหล่อฉีด (High Pressure Die Casting) เพราะเหล็กช่วยลดการเชื่อมติดของงานหล่อกับแม่พิมพ์ (Soldering Effect) การเย็นตัวอย่างรวดเร็วในกระบวนการหล่อดังกล่าวช่วยลดการเกิดเฟส Al_5FeSi ที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง



รูปที่ 2.8 เฟสของ Al_7FeSi ที่มีลักษณะเป็นเข็ม
ที่มา : จิตติ (2551)



รูปที่ 2.9 เฟสของ $\text{Al}_{15}(\text{MnFe})_3\text{Si}_2$ ที่มีลักษณะโค้งมนขึ้นทำให้ช่วยลดผลเสียจากการมีเหล็กปนเปื้อนได้

ที่มา : เซาวลิต (2551)

2.6.6 อะลูมิเนียมผสมเกรด A356

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A356 เป็นอะลูมิเนียมผสมประเภทไฮโปยูเทคติก ซึ่งประกอบด้วย

2.6.6.1 ซิลิคอน (Si)

ซิลิคอน ร้อยละ 6.5-7.5 โดยน้ำหนัก ซิลิคอนที่ผสมอยู่ใน A356 ส่งผลให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวมีการไหลตัวที่ดี ทำให้สามารถหล่องานในแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนได้ดี และยังคงความแข็งแรงไว้ ทั้งยังช่วยเพิ่มความทนทานการสึกกร่อน และลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปส่งผลให้การหล่อ และการฉีดขึ้นรูปทำได้ยาก

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกิดไปส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะ เมื่อได้รับแรงอัด

หรือแรงดึง

2.6.6.2 แมกนีเซียม (Mg)

แมกนีเซียม ร้อยละ 0.25-0.40 โดยน้ำหนัก มีผลอย่างมากต่อชิ้นงานหล่อเมื่อไปรวมตัวกับซิลิคอน (Si) แล้วจะเกิดสารประกอบใหม่ คือ แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si)

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไป ส่งผลให้อะลูมิเนียมเกรด A356 หลอมได้ยากขึ้นในเตาหลอมอะลูมิเนียม

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้เกิดแมกนีเซียมซิลิไซด์ในปริมาณมากเกินไปทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งที่มากเกินไป และทำให้ชิ้นงานเปราะแตกหักได้ง่าย

2.6.6.3 เหล็ก (Fe)

เหล็ก ร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก เหล็กจัดเป็นสารมลทินทั้งสิ้น เพราะโลหะหลอมเหลวสามารถละลายเอาเหล็กจากเตาหลอมจากเหล็กกวนน้ำอะลูมิเนียม หรืออื่นๆ เหล็กจะรวมอยู่ในรูปของเหล็ก-อะลูมิเนียม (Fe-Al) และเหล็ก-อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Fe-Al-Si) เป็นสภาพเฟสฝังตัวอยู่ในโครงสร้างทำให้อะลูมิเนียมเปราะ และไม่ต้านทานการผุกร่อน

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปส่งผลให้การถอดแบบของชิ้นงานนั้นยาก และทำให้ผิวของชิ้นงานนั้นไม่เรียบ

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปส่งผลให้กระบวนการหล่อแข็งตัวช้า และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อต่ำ

2.6.6.4 ไทเทเนียม (Ti)

ไทเทเนียม ร้อยละ 0.1-0.15 โดยน้ำหนัก ไทเทเนียมเป็นสารปรับสภาพให้เกรนมีความละเอียด ซึ่งส่งผลต่อความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด A356 และเมื่อนำชิ้นงานไปอบ ไทเทเนียมสามารถละลายเข้าไปยังเนื้อของอะลูมิเนียมทำให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็ง และความแข็งแรงต่ำลง เพราะเกรนของอะลูมิเนียมจะโตจนเกินไป

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงจนเกินไป เพราะเมื่อชิ้นงานผ่านการอบไทเทเนียมสามารถละลายเข้าไปในเนื้อของอะลูมิเนียม ทำให้ความแข็งของชิ้นงานยิ่งสูงขึ้นไปอีก ทำให้ชิ้นงานจะเปราะ และแตกหักได้ง่าย

2.6.6.5 สตรอนเซียม (Sr)

สตรอนเซียม 50-120 มิลลิกรัมต่อลิตร (PPM) สตรอนเซียมเติมเพื่อปรับโครงสร้างเกรนของชิ้นงานหล่อ คือ สตรอนเซียมจะส่งผลให้เกรนของอะลูมิเนียมที่มีความละเอียดขึ้น

2.6.6.6 ธาตุอื่นๆ

ธาตุอื่นๆ ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn), แมงกานีส (Mn), นิกเกิล (Ni), ดีบุก (Sn), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb) มากกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ธาตุมลทินในอะลูมิเนียมผสมที่ปนเข้าไปส่งผลให้การยึดตัว ความเหนียว และการต้านทานการผุกร่อนลดลงต่ำลง

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปยิ่งส่งผลดีต่อชิ้นงาน เพราะจะทำให้ชิ้นงานมีความบริสุทธิ์ และแสดงถึงการควบคุมการหล่อที่ดี

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปยิ่งส่งผลเสียต่อชิ้นงาน เพราะธาตุเหล่านี้จะไม่เข้าไปแทรกตัว และไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อของอะลูมิเนียมทำให้สมบัติด้านต่างๆ เสียไป เช่น แข็งจนเกินไปทำให้ชิ้นงานเปราะ ทนต่อการผุกร่อนได้ต่ำ หรือการยึดตัว (Elongation) และความเหนียว (Ductility) แ่ลง

2.7 กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting)

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมในแบบหล่อถาวร โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงในการเทน้ำโลหะลงแบบหล่อการออกแบบระบบหล่อที่ประกอบด้วย รูทางวิ่งทางเข้า รูสัน ช่องว่างที่เป็นตัวแบบ และแบบหล่อที่มี 2 ส่วน นำมาประกบกันยึดติดด้วยอุปกรณ์ช่วยยึดแน่นซึ่งอาจจะติดตั้งบนที่ตั้งให้แน่นอน นอกจากนั้นควรมีระบบแกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อภายหลังการเทน้ำโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อเพื่อสะดวกในการทำงานให้เกิดความรวดเร็ว

2.7.1 อุณหภูมิแบบหล่อ

อุณหภูมิของแบบหล่อถาวรมีผลกระทบต่อ การเกิดจุดบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อได้ และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบบหล่อดังนี้

2.7.1.1. อุณหภูมิแบบหล่อสูง (High Mold Temperature) มีผลเสียในเรื่องความถี่ของรอบการปฏิบัติงานนานขึ้น (Longer Cycle Time In Production) และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน แต่มีข้อดีในเรื่องความแตกต่างของอุณหภูมิแบบหล่อกับน้ำโลหะที่มีความแตกต่างทางความร้อน (Thermal Gradient) น้อย

2.7.1.2 อุณหภูมิแบบหล่อต่ำ (Low Mold Temperature) มีผลเสียเกิดขึ้นกับการหล่อชิ้นงาน เช่น ทำให้น้ำโลหะแข็งปิดทางเดินของโลหะหลอมเหลว (Cold Shuts) ก่อนที่โลหะหลอมเหลวจะเต็มเต็มแบบหล่อ ทำให้กระบวนการผลิตเกิดข้อผิดพลาด เกิดการหดตัว การแตกร้าว ขณะร้อน ผิวชิ้นงานหยาบไม่เรียบ (อภิณัฐ และวัชรมน, 2554)

2.7.2 สารเคลือบผิวแบบหล่อ และชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อ

ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกัน และยังทำให้ความหนาของแบบหล่อเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น ในกรณีการเคลือบผิวของแบบหล่อส่งผลต่อความหนาของแบบหล่อที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้อุณหภูมิของแบบหล่อต่ำลง ผิวของชิ้นงาน และความหนาของชิ้นงานที่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2.7.3 อุณหภูมิการหลอม และอุณหภูมิเทน้ำโลหะ (Pouring Temperature; T_p)

อุณหภูมิในการหลอมโลหะผสมจะปรับเปลี่ยนไปตามชนิดของเตาที่ใช้ ธาตุผสมของโลหะ น้ำหนักของชิ้นงานหล่อ การเคลือบผิวแบบหล่อ ระบบทางเดินของโลหะหลอมเหลวภายในแบบหล่อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลว ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องหาจุดที่เหมาะสมในการหาอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวสามารถอธิบายได้ 2 กรณี ดังนี้

2.7.3.1 อุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวต่ำ (Low Pouring Temperature) อาจทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่ไม่เต็มแบบหล่อ เพราะระบบทางเข้า หรือรูสันเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะมีการแข็งตัวของชิ้นงาน และความหนารอยต่อระหว่างหน้ากับบางของแบบหล่อ เกิดการแข็งตัวเร็ว และขัดขวางการแข็งตัวของส่วนอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดจุดตำหนิต่างๆ เช่น รูพรุน ชิ้นงานที่ได้ไม่มีคุณภาพ และเกิดรอยต่อระหว่างโลหะหลอมเหลวแข็งปิดทางเดินโลหะหลอมเหลว

2.7.3.2 อุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวสูง (High Pouring Temperature) ทำให้เกิดการหดตัวสูง เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ขนาดของชิ้นงานที่ได้มีขนาดไม่แน่นอน และทำให้ธาตุที่ผสมในอะลูมิเนียมสูญเสีย (Heat Loss) ได้มาก และยังส่งผลต่อเวลาของกระบวนการแข็งตัวที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังลดอัตราการผลิต และอายุการใช้งานของแบบหล่อ

2.8 การเพิ่มความแข็งแรงให้โลหะ (Strengthening Mechanisms)

2.8.1 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening)

คือ การเติมธาตุโลหะผสมหนึ่งถึงสองธาตุที่สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็ง กล่าวคือ เมื่ออะตอมของธาตุผสมละลายแล้วไปแทนที่ (Substitution) หรือแทรก (Interstitial) อยู่ในโครงผลึกของโลหะตั้งต้น จะเกิดแรงเค้นล้อมรอบอะตอมธาตุผสม ซึ่งส่งผลกระทบต่อทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้ โลหะผสมที่เป็นสารละลายของแข็งจึงมีความแข็งแรงกว่าโลหะบริสุทธิ์ และสองตัวแปรที่สำคัญในการทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยสารละลายของแข็งมีดังนี้

2.8.1.1 ขนาดอะตอมสัมพัทธ์ (Relative Size) กล่าวคือ ถ้าขนาดอะตอมของธาตุผสมกับขนาดอะตอมของโลหะตั้งต้นยังมีความแตกต่างกันมาก จะยิ่งทำให้โครงสร้างผลึกของโลหะ ตั้งต้นมีความบิดเบี้ยวไปมาก และยิ่งทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น

2.8.1.2 การรวมตัวของธาตุผสม (Short Rang Order) เนื่องจากในสารละลายของแข็งอะตอมธาตุผสมจะละลายแบบสุ่ม จึงเกิดการรวมตัวของธาตุผสมเป็นกลุ่มเล็กๆ ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น เนื่องจากต้องเคลื่อนผ่านโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างอะตอมต่างกัน

โลหะผสมอะลูมิเนียมสำหรับงานหล่อพัฒนาจากระบบยูเทคติกของระบบ 2 ธาตุ เช่น อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Al-Si) อะลูมิเนียม-ทองแดง (Al-Cu) และอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Al-Mg) อย่างไรก็ตาม การใช้งานส่วนใหญ่พัฒนามาจากระบบอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยการเติมธาตุแมกนีเซียม และหรือทองแดง ทำให้โลหะผสมเหล่านี้สามารถชุบแข็งได้ด้วยการตกตะกอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Strengthening By Precipitation Hardening) การเติมธาตุผสมบางอย่าง เช่น Ni, Cr และ Mn ยังช่วยให้โลหะผสมแข็งเพิ่มขึ้นโดยกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Strengthening By Solid Solution) และยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Strength) ได้ด้วย ชนิดของโลหะผสมอะลูมิเนียม (Alloy Type) มี 3 ประเภทหลัก คือ โลหะผสมไฮโปยูเทคติก (Hypo Eutectic Alloys) เช่น ASTM 319, ASTM A356 โลหะผสมใกล้ยูเทคติก (Near Eutectic Alloys) เช่น ASTM A413, ASTM 384 และโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (Hyper Eutectic Alloys) เช่น LM28 (UK Standard)

2.8.2 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการเสีรูปร่าง

การขึ้นรูปร่างเย็น หรือการทำให้แข็งด้วยการยัด เป็นวิธีหนึ่งที่สำคัญสำหรับการทำให้เกิดความแข็งแรงในโลหะบางชนิด ยกตัวอย่างเช่น ทองแดงบริสุทธิ์ และอะลูมิเนียมสามารถถูกทำให้เกิดความแข็งแรงด้วยวิธีการแบบนี้เท่านั้น ดังนั้นเส้นลวดอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เมื่อได้นำมาทำการลดขนาดแบบเย็นจะสามารถทำให้เกิดความแข็งแรง จากการทำให้แข็งด้วยปริมาณการยัดขนาดต่างๆ

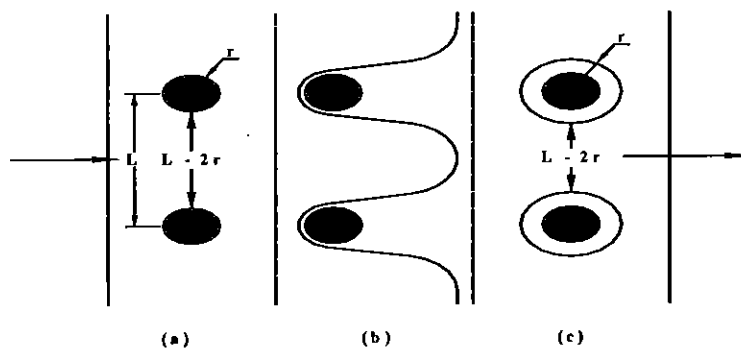
ความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่เพิ่มขึ้นเกิดจากดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นใหม่เกิดปฏิกิริยากับดิสโลเคชันที่มีอยู่เดิม ทำให้ดิสโลเคชันใหม่เคลื่อนผ่านดิสโลเคชันที่มีอยู่เดิมได้ยากยิ่งขึ้น ความระเกะระกะของดิสโลเคชัน ทำให้โลหะเกิดความแข็งแรงจากการยัด หรือการเสีรูปร่างจากการเพิ่มปริมาณการขึ้นรูปร่าง หรือพิจารณาได้จากการนำโลหะเหนียว เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็ก เฟอร์ไรต์ที่ผ่านการอบอ่อนมาทำการขึ้นรูปร่างที่อุณหภูมิห้อง พบว่า มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ผลของการขึ้นรูปร่างที่อุณหภูมิห้องซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้

2.8.3 การเพิ่มความแข็งแรงโดยการลดขนาดเกรน (Grain Boundary Strengthening)

การทำให้เกรนละเอียด (Grain Refinement) หลักการคือ ขอบเกรนแข็งแรงกว่าเนื้อเกรน โดยเฉพาะในโลหะหล่อ เช่น อะลูมิเนียมหล่อ เติม Ti-B เพื่อทำให้เกรนอะลูมิเนียมละเอียด กลไก คือ เร่งการเกิดนิวเคลียส ลดการขยายตัวของเกรน (E-book มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2001)

2.8.4 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (Fine Particle Strengthening)

กระบวนการนี้เป็นการเติมอนุภาคขนาดเล็กเข้าไปโดยตรง โดยความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นได้จากการที่อนุภาคเหล่านี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน และเกิดเป็นวงดิสโลเคชันรอบๆ อนุภาค แสดงรูปที่



รูปที่ 2.10 การเกิดดิสโลเคชันรอบๆ อนุภาค
ที่มา : สุรียา (2553)

2.8.5 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการเปลี่ยนเฟส

กระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนท์ (Austenite) ไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) และอาศัยการแทรกตัวของคาร์บอนในมาร์เทนไซต์ ที่ทำให้เกิดสนามความเครียดในมาร์เทนไซต์ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

2.9 การกวนหล่อ

วิธีการที่จะทำให้ส่วนเสริมแรงที่จะใส่ลงไปเนื้อพื้นขณะกำลังหลอมละลายนั้นเกิดการกระจายตัวได้ดีมีความสำคัญมาก สำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบแบบเติมอนุภาค ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ดังนี้

2.9.1 การฉีดอนุภาคพร้อมก๊าซเฉื่อยโดยใช้เครื่องอินเจคชั่น อนุภาคจะผสมกับโลหะหลอมเหลว และก๊าซจะลอยตัวออกมา

2.9.2 การเติมอนุภาคลงในขณะที่น้ำโลหะไหล ถูกเทลงในแม่พิมพ์

2.9.3 การเติมอนุภาคโดยการผลักเข้าไปในน้ำโลหะโดยใช้ลูกสูบ

2.9.4 ฟันโลหะหลอมเหลวพร้อมอนุภาคลงบนสารตั้งต้น

2.9.5 ใช้แรงเหวี่ยงในการทำให้อนุภาคกระจายตัวในของเหลว

2.9.6 ทำการแพ็คอนุภาคให้เป็นเม็ดจากนั้นใส่ลงในน้ำโลหะหลอมเหลวให้อนุภาคที่แพ็คไว้ละลาย และทำการกวน

2.9.7 การฉีดอนุภาคพร้อมโลหะหลอมเหลว โดยใช้การให้รังสีอินฟราเรด และอัลตราซาวด์ความเข้มสูงช่วยในการทำให้อนุภาคกระจายตัว

2.9.8 ใช้สภาวะสุญญากาศแรงดึงดูดที่สูงมาก และการให้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่น่าสนใจ และเป็นที่ยอมรับในการผลิต ซึ่งทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ดีในน้ำโลหะหลอมเหลว ซึ่งจำเป็นอย่างมากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีโลหะเป็นเนื้อพื้น (J.Hashim, 1999)

2.10 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แสงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ โดยใช้ช่วงคลื่นแสงที่ได้มีกำลังขยายตั้งแต่ 20-1,000 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงมีขั้นตอนดังนี้

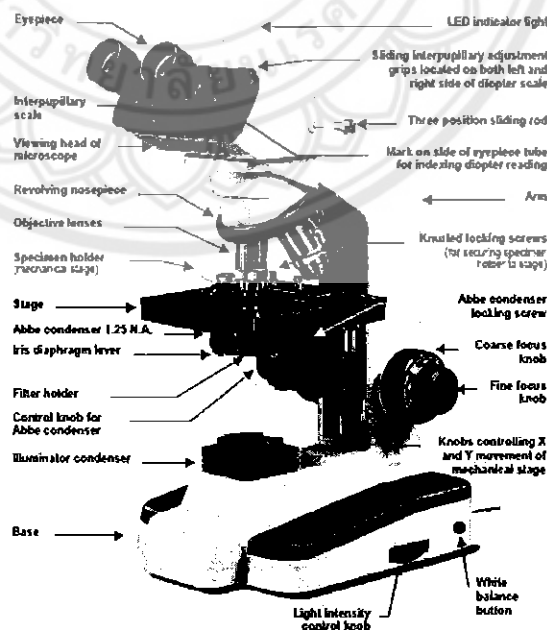
2.10.1 วางชิ้นตรวจสอบบนที่วางของกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ ทั้งนี้เพื่อการปรับชิ้นตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยังเป็นการปรับระยะชัดเจนของภาพอีกด้วย

2.10.2 เปิดสวิตช์ และปรับความเข้มชั้นของแสงตามต้องการ

2.10.3 ปรับระยะชัดเจนของภาพ (Focus) สามารถปรับได้ 2 ระบบ คือ การปรับหยาบ (Coarse Focus Control) จะสามารถปรับระยะชัดเจนของภาพได้รวดเร็ว แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ และการปรับละเอียด (Fine Focus Control) จะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มี ความผิดพลาดเกิดขึ้นเลย

2.10.4 เมื่อได้ภาพที่ชัดเจนแล้วอาจจะมีการถ่ายภาพไว้ในกรณีที่กล้องจุลทรรศน์นั้นสามารถติดตั้งกล้องถ่ายภาพได้ แสดงรูปที่ 2.11

2.10.5 เมื่อหยุดการทำงานให้ปิดสวิตช์ และนำชิ้นตรวจสอบออกจากที่วาง ควรระวังไม่ให้ชิ้นตรวจสอบกระทบกับเลนส์วัตถุ เพราะอาจจะทำให้เลนส์นั้นมีรอยเกิดขึ้น ส่งผลให้การมองภาพไม่ชัดเจน



รูปที่ 2.11 กล้องจุลทรรศน์แสง

ที่มา : ชาวลิต (2542)

2.11 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

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

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงรูปที่ 2.12 เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า จึงเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์ อื่นหลายสาขา



รูปที่ 2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : Becthai Bankok (1993)

2.11.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

2.11.1.1 ลักษณะของชิ้นงาน จะต้องอยู่ในสถานะของแข็งทุกลักษณะ เช่น ผง, แผ่น เป็นต้น ชิ้นงานต้องแห้งไม่มีความชื้น ถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่ต้องตัดส่วนที่จะดูให้อยู่ที่ประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และหากชิ้นงานมีการนำไฟฟ้าดี สามารถนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้เลย

2.11.1.2 ชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้า จะต้องทำการเตรียมชิ้นงานก่อน โดยที่ทำการเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าหนาประมาณ 100 อังสตรอม สำหรับวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิว ได้แก่ ทอง, ทองผสมแพลตินัม และคาร์บอน ซึ่งการเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยทอง หรือทองผสมแพล-

ตินัม จะให้ได้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน แต่ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจะทำให้ข้อมูลทางเคมีที่ได้จากเทคนิค EDXS บิดเบือนไปได้

สำหรับชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้าอาจไม่ต้องทำการเคลือบผิวหน้าชิ้นงานก็ได้ โดยเสี่ยงไปใช้ที่ระบบสุญญากาศต่ำแทน (บัญชา และศุภกาญจน์, 2544)

2.11.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ การดูลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงาน และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน

2.11.2.1 การดูลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของพื้นผิว โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) โดยภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) จะได้ภาพเป็นพื้นผิวที่มีลักษณะสูงต่ำ มีร่องรอยที่เกิดขึ้นจริงบนชิ้นงาน สามารถวัดขนาดบนชิ้นงานนั้นได้ และภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered Electron) จะได้ภาพเป็นลักษณะพื้นผิวของงาน แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของชิ้นงานแบ่งเป็น เฟสสว่าง และเฟสมืด โดยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ

2.11.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน โดยใช้ร่วมกับเทคนิคด้วยหลักการของรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าในชิ้นงานมีองค์ประกอบทางเคมีใดบ้าง โดยแสดงเป็นกราฟบอกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุนั้นๆ และสามารถวัดการกระจายขององค์ประกอบทางเคมีได้

2.12 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

ความแข็ง คือ สมบัติที่วัสดุสามารถต้านทานรอยกด ซึ่งความแข็งรวมถึงความต้านทานต่อการกด การขีด การขีด และการตัด ความแข็งของวัสดุเกี่ยวข้องกับการจับตัวอะตอม และโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่ม เมื่อวัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโลหะ และเซรามิกจะแข็งกว่าพวกพอลิเมอร์

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลจะใช้หัวกดเป็นลักษณะหัวบอล (Ball Indenter) ทำจากเหล็กกล้า และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยมีการทดสอบ คือ การใช้หัวกด Ball กดลงบนชิ้นงานจนทำให้เกิดรอยกด (Impression) เป็นลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลม แสดงรูปที่ 2.13 เนื่องจากการทดสอบนี้จะทำการแปรผลค่าความแข็งจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด ดังนั้นรอยกดที่เกิดขึ้นไม่ควรแสดงลักษณะที่บิดเบี้ยว หรือสึกเกินไปจนอาจมีผลทำให้ค่าความแข็งผิดพลาดได้ แสดงรูปที่ 2.13

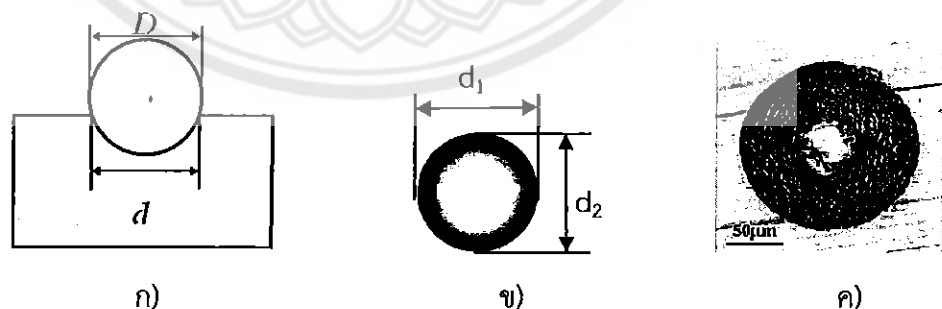
ค่าความแข็งแบบบริเนลปกติอยู่ในช่วง 90 ถึง 630 HB ถ้ามีค่าสูงขึ้นหมายความว่ามีความแข็งมากขึ้น ซึ่งรอยกดที่ลึกจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดมากแต่มีความแข็งน้อย ในกรณีที่ใช้หัวกดลูกบอลขนาด 10 มิลลิเมตร ถ้ารอยกดที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า 6 มิลลิเมตร ควรปรับลดน้ำหนักกดลง

ในขณะที่หัวกดเคลื่อนสู่พื้นผิวของวัสดุ เนื้อวัสดุรอบหัวกดจะแข็งขึ้น และเนื้อวัสดุส่วนนี้จะทำความแข็งแรงเกิน 650 HB ไม่ควรเชื่อถือมากนัก เนื่องด้วยสองเหตุผลประการแรกเส้นผ่านศูนย์กลาง รอยกดน้อยเกินไปทำให้การอ่านค่าไม่แม่นยำ ประการที่สองถ้าวัสดุแข็งมากหัวกดบอลจะยุบตัวทำให้แบนเรียบ และให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าความแข็งที่คำนวณได้เชื่อถือไม่ได้ซึ่งปกติมีวัสดุไม่มากนักที่มีความแข็งแรงเกิด 650 HB

โดยทั่วไปวัสดุที่มีความแข็งประมาณ 150 HB หรือมากกว่านั้นจะใช้น้ำหนักกด 3000 กิโลกรัมแรง ส่วนน้ำหนักกด 1500 กิโลกรัมแรง จะใช้กับวัสดุที่มีความแข็ง 75 ถึง 300 HB และ 500 กิโลกรัมแรง ใช้กับวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่า 100 HB ในบริเวณที่คาบเกี่ยวกันให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม และขึ้นทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่า ของความลึกรอยกด ถ้าทำการทดสอบกับชิ้นงานที่บางกว่านี้ความแข็งของแท่นวางอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งของวัสดุได้

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลมีข้อดี และข้อเสีย คือ เป็นการทดสอบแบบทำลายซึ่งจะมีรอยกดปรากฏอยู่บนพื้นผิววัสดุหลังการทดสอบ ดังนั้นวัสดุที่ผ่านการทดสอบจะไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้อีก นอกจากนั้นเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลมีน้ำหนักมากประมาณ 200 ปอนด์ จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานภาคสนาม รวมทั้งราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับเครื่องทดสอบความแข็งแบบอื่น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับวิธีการฝึกสอน ประสบการณ์ และทัศนคติของผู้ทดสอบในการวัดรอยกด ซึ่งอาจทำให้การอ่านค่ารอยกดได้แตกต่างกัน แต่ปกติแล้วความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะมีน้อย คือ คลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10

ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบบริเนล คือ เป็นวิธีการทดสอบที่เก่าแก่จนเป็นที่ยอมรับและเป็นที่ยอมรับของส่วนใหญ่ ตลอดจนผลการทดสอบความแข็งที่ได้รับยังเป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรม รวมทั้งการทดสอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว คือ ประมาณ 2 นาที ในการดำเนินการทดสอบ



รูปที่ 2.13 วิธีการวัดความแข็งแบบบริเนล

ก) รอยกด Impression จากหัว Ball

ข) การวัดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด

ค) รอยกดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบบริเนล

ที่มา : Sukangkana Lee (2553)

ในการวัดความแข็งหัวบอลจะถูกกดลงบนผิวชิ้นงานเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที หลังจากนั้นนำน้ำหนักกดออกแล้วจะทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดจำนวน 2 ค่า โดยใช้กล้องที่มีกำลังขยายต่ำ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะถูกนำมาคำนวณค่าความแข็ง จากค่าน้ำหนักกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดขึ้นจากสมการ

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

โดยที่ HB คือ ค่าความแข็งบริเนล (Kgf.mm^{-2})

P คือ น้ำหนักกด (Applied load), kgf

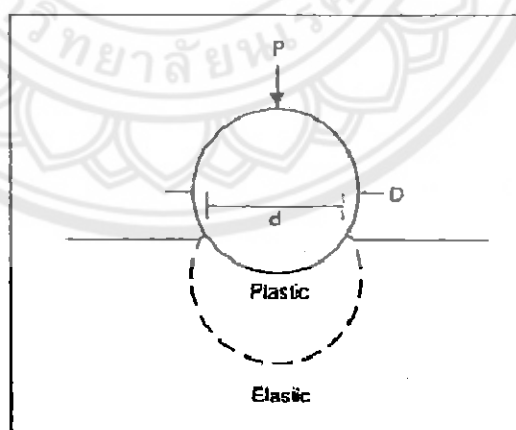
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดบอล (mm)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm)

T คือ ความลึกของรอยกด (mm)

หมายเหตุ ค่า HB ที่วัดได้มีหน่วยเป็น kgf.mm^{-2} (กิโลกรัมแรง/ตารางมิลลิเมตร) ($\text{kgf.mm}^{-2} = 9.8 \text{ MPa}$)

โดยทั่วไปแล้วควรมีการเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน เพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งโดยการปรับสภาพผิวของชิ้นงานให้ราบเรียบ และปราศจากเศษโลหะ หรือสิ่งสกปรกตกค้าง เพราะปัจจัยเหล่านี้อาจทำให้ได้ค่าความแข็งที่วัดได้ที่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 2.14 การแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล
ที่มา : ฐานนิยม (2551)

เมื่อเราพิจารณาเนื้อโลหะ หรือวัสดุบริเวณใต้หัวกดจะพบว่า มีการแปรรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) แสดงรูปที่ 2.14 และบริเวณดังกล่าวนี้จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณของเนื้อโลหะที่มีการแปรรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ซึ่งจะทำหน้าที่ขัดขวางการไหล หรือเคลื่อนตัวแบบถาวร (Plastic Flow) ของเนื้อโลหะด้านบน ในสภาพดังกล่าวนี้ถือว่าการแปรรูปของโลหะนั้นถูกจำกัด (Plane Strain Compressive) ซึ่งหากเนื้อโลหะด้านล่างไม่มีความยืดหยุ่น หรือแข็งเกร็ง (Rigid) อาจจะทำให้เนื้อโลหะที่แปรรูปแบบถาวรเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนล้อมรอบหัวกด อย่างไรก็ตาม เราจะไม่ค่อยพบสภาวะเช่นนี้ เนื่องจากเนื้อโลหะที่ถูกแทนที่ด้วยหัวกดนั้นจะถูกพิจารณาว่าเกิดมาจากปริมาตรที่ลดลงของเนื้อวัสดุที่แปรรูปแบบยืดหยุ่นโดยรอบ

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Dehghan Hamedan (2012) และคณะได้ทำการศึกษาปัจจัยของกระบวนการถวนหล่อ เช่น ความเร็วในการถวน อุณหภูมิ และการควบคุมขนาดของอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาด 25-50 นาโนเมตร ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของอะลูมิเนียม และขนาดของอะลูมิเนียมที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป A356 (Ingot) กับผงของอะลูมิเนียมขนาด 45 ไมโครเมตร ความเร็วรอบในการถวนที่ 450, 700 และ 900 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในการหล่อขึ้นงานที่ 650, 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการทดสอบความแข็งแรงการดึง การต้านทานแรงกด และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสมบัติที่ดีของวัสดุเชิงประกอบจะดีที่สุดเมื่อความเร็วในการถวน 700 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการหล่อที่ 750 องศาเซลเซียส และขนาดของผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากจะมีการเข้ากันได้ดีกว่าขนาดของอะลูมิเนียม A356

S.A. Sajjadi และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ ขนาดอนุภาคของผงอะลูมินา โดยใช้ขนาดเป็นไมโครเมตร และนาโนเมตร และความเร็วในการถวนหล่อที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความแข็งแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ โลหะผสมอะลูมิเนียม A356/อะลูมินา ด้วยวิธีถวนหล่อ และมีการเติมอาร์กอนให้กับน้ำโลหะในระหว่างการถวน พบว่าก๊าซอาร์กอนจะทำให้การเข้ากันระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 กับอะลูมินาได้ดี เมื่อใช้ความเร็วในการถวน 300 รอบต่อนาที จะมีการกระจายตัวของอะลูมินาที่ดีที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณ และลดขนาดของอะลูมินาจะทำให้ความสามารถในการเปื่อยผิวดลลง ความแข็ง และความพรุนตัวเพิ่มขึ้น ปริมาณที่ดีที่สุดคือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอนุภาคขนาดไมโครเมตร และร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในอนุภาคขนาดนาโนเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมินาจะทำให้ค่าความแข็งแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าอนุภาคขนาดนาโนเมตร ค่าความแข็งแรงอัดจะมากกว่าอนุภาคขนาดไมโครเมตร

S. AMIRKHANLOU, B. NIOUMAND (2010) ได้ทำการทดลองผลิตวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียม A356/ซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นส่วนเสริมแรง มีขนาดอนุภาค 8 และ 3 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของอะลูมิเนียม ผลิตด้วยกระบวนการถวนหล่อ ที่

อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที และเติมอนุภาคของส่วนเสริมแรงเข้าไปให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการฉีดเข้าแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิ 607 และ 650 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 607 องศาเซลเซียส น้ำโลหะจะเกิดเป็นโลหะกิ่งเหลว ใช้ก๊าซอาร์กอน เป็นตัวช่วยจับฟองอากาศออกจากกระบวนการ หลังจากได้ชิ้นงานแล้วทำการตรวจสอบรูพรุน โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็ง ได้ว่า ขนาดอนุภาค 3 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 5 เทที่อุณหภูมิ 607 พบว่ามีรูพรุนน้อยที่สุด และมีค่าความแข็งมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเท่ากัน และขนาดอนุภาคต่างกัน พบว่าที่ขนาดอนุภาคเล็กกว่านั้น ชิ้นงานมีรูพรุนน้อย และมีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่มีอนุภาคใหญ่กว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคเท่ากัน อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิเท่ากัน ชิ้นงานจะมีรูพรุนน้อย และมีค่าความแข็งมากกว่า ชิ้นงานที่เทด้วยอุณหภูมิสูงกว่า การทำให้อลูมิเนียมกลายเป็นผงก่อนนำ มาผสมกับอนุภาคส่วนเสริมแรง จะทำให้ค่าการเปื่อยกผิวจะเพิ่มขึ้นมากกว่าการกวนหล่อเพียงอย่างเดียว การเทน้ำโลหะเหลวหากเทในช่วงอุณหภูมิที่แข็ง จะทำให้ค่าการเปื่อยกผิว และการกระจายตัวดีกว่าช่วงอุณหภูมิเหนือการแข็งตัว การเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ลงไป ในกระบวนการทำให้อลูมิเนียมเป็นผง และนำไปกวนหล่อ ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และรูพรุนลดลงร้อยละ 68

G. Ramu and Ranjit Bauri (2009) ได้ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นอะลูมิเนียมที่ผลิตจากกระบวนการกวนหล่อ ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาค 30 ไมโครเมตร เป็นจำนวนร้อยละ 5, 10 โดยปริมาตร วัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้นำไปเพิ่มการกระจายตัวด้วยวิธี Equal Channel Angular Pressing (ECAP) พบว่าผลของมุมทำให้ขนาดของเกรนของวัสดุเนื้อพื้น ในอะลูมิเนียมผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีขนาดของเกรนลดลงเป็น 8 ไมโครเมตร จาก 45 ไมโครเมตร ในขณะที่เดียวกันอะลูมิเนียมผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ขนาดของเกรนลดลงเป็น 16 ไมโครเมตรจาก 45 ไมโครเมตร แล้วทำการทดสอบวัดค่าความแข็ง และการต้านทานแรงกด ที่อุณหภูมิห้องในการประเมินสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลการทดลองปรากฏว่า ความแข็งและความต้านทานแรงอัดดีขึ้น

F. Akhlaghi A. Lajevardi and H.M. Maghanaki (2004) ในงานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบและศึกษาอะลูมิเนียม A356 เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ผลิตด้วยวิธี Compcasting ในด้านผลกระทบของอุณหภูมิการหล่อ และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งจะให้มีการเพิ่ม และลดของปริมาตรอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยใช้เครื่องกวนผสม ในขณะที่อุณหภูมิมีสถานะโลหะกิ่งเหลว จากนั้นเทเข้าแม่พิมพ์ถาวรที่อุณหภูมิแตกต่างกันในขณะที่เป็นของแข็งบางส่วน (SS) หรือให้ความร้อนอีกครั้งจนกลายเป็นของเหลวแล้วจึงเทลงแม่พิมพ์ถาวร (SL) ศึกษาการกระจายตัวภายในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่เป็น SS และ SL รวมถึงศึกษา รูพรุน ขนาดอนุภาค และปริมาณของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมมีความสัมพันธ์ และเกี่ยวเนื่องกันอย่างไร ในผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงว่าในชิ้นงานที่เป็น SS มีความต้านทานการสึกหรอมากกว่า ชิ้นงาน SL และในตัวอย่าง

เนื้อพื้นโลหะผสม ข้อสังเกตเหล่านี้อยู่ในด้านของอุณหภูมิการหล่อ ซึ่งส่งผลกับลักษณะโครงสร้างจุลภาค และการก่อตัวของโครงสร้างจุลภาค ลักษณะเดนไดรท์ของชิ้นงานตัวอย่าง SS และ SL ตามลำดับ

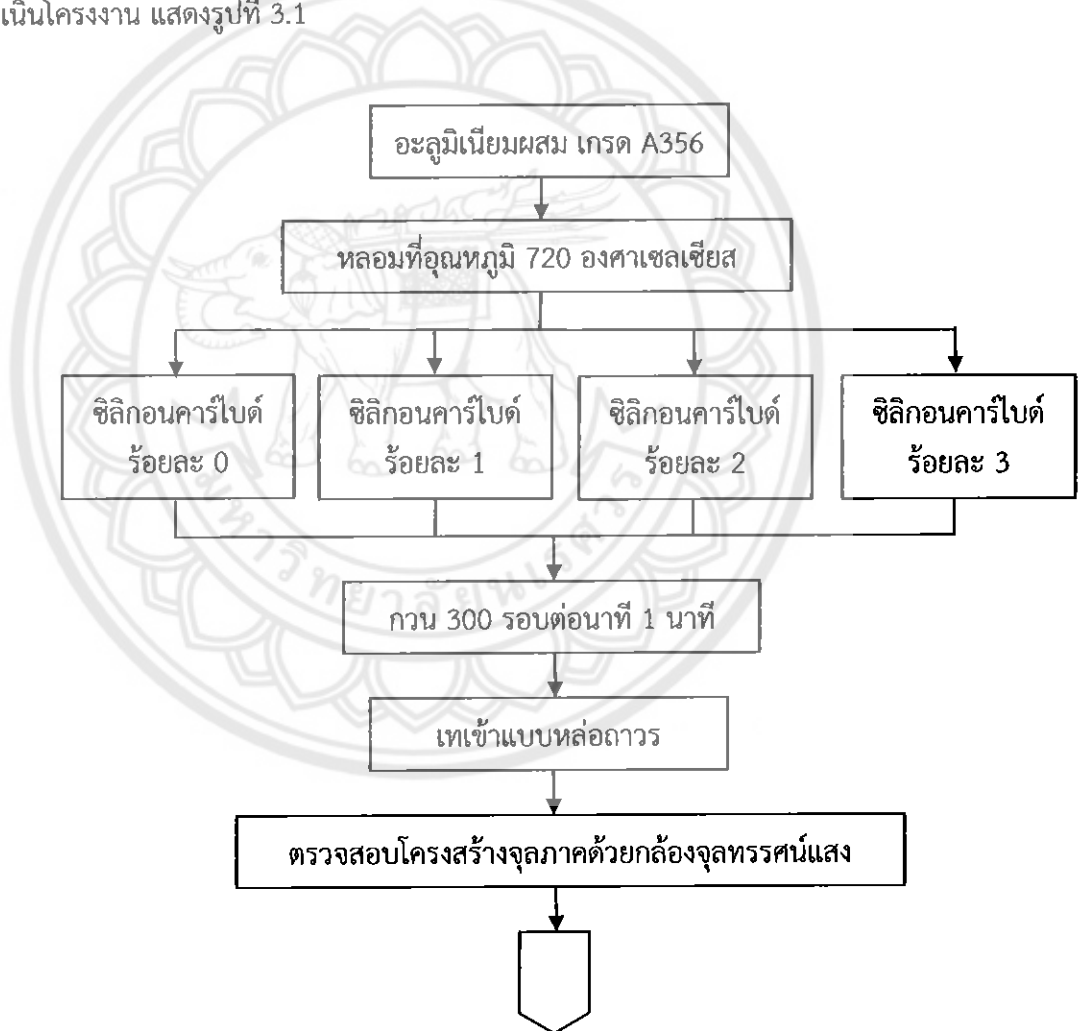


บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ

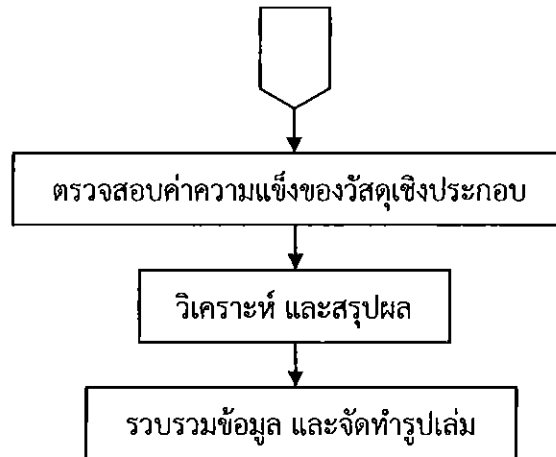
บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินโครงการที่จะบอกถึงขั้นตอนการดำเนินโครงการ วัสดุ อุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

การศึกษาผลของปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกวนหล่อในแบบหล่อถาวร โดยมีขั้นตอนการดำเนินโครงการ แสดงรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ



รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการงาน

คือ อะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ใช้ทำการทดลองเป็นอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ประเภทไฮโปยูเทคติก ส่วนผสมทางเคมี แสดงตารางที่ 3.1 และผงซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาด 100-150 ไมโครเมตร ที่ได้จากกระดาษทรายเก่า

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 โดยทั่วไป

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

ที่มา : อภินันท์ และวัชรมน (2554)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงการงาน

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการดำเนินงาน

- ก. เตาทลอมโลหะ
- ข. แม่พิมพ์ถาวร
- ค. เทอร์โมคอปเปิล Type K
- ง. เบ้าหลอม
- จ. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ฉ. เครื่องขัดผิวโลหะ
- ช. กระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
- ซ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียด 1 ไมครอน
- ญ. เครื่องกวนน้ำโลหะ

3.2.2.2 สารเคมี

- ก. กรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร
- ข. น้ำกลั่น

3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการดำเนินโครงการงาน

- ก. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- ข. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล
- ค. กล้องถ่ายภาพ

3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน

3.3.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการดำเนินโครงการงาน

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมเกรด A356 และศึกษาขั้นตอนการหล่อโลหะด้วยกระบวนการกวนหล่อ

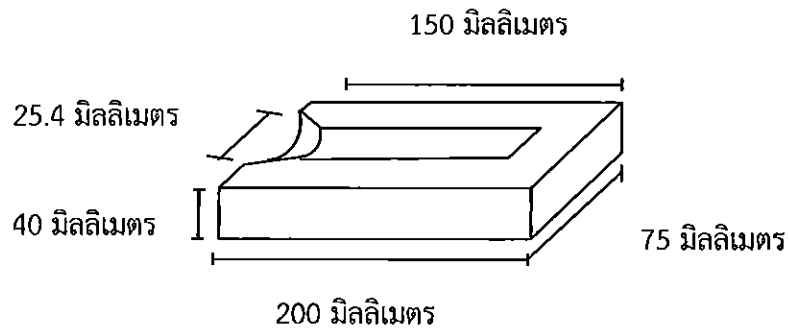
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ-อุปกรณ์

3.3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินโครงการงาน

นำล้อยแม่กอะลูมิเนียม เกรด A356 น้ำหนัก 7 กิโลกรัม มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วทำความสะอาด

3.3.2.2 การเตรียมแม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าที่มีรูปร่าง และขนาดของแม่พิมพ์มีลักษณะเหมือนกัน 2 ชิ้นมาประกบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหล่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร แสดงรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์ถาวร

3.3.3 ขั้นตอนการกวนหล่ออะลูมิเนียมผสม เกรด A356

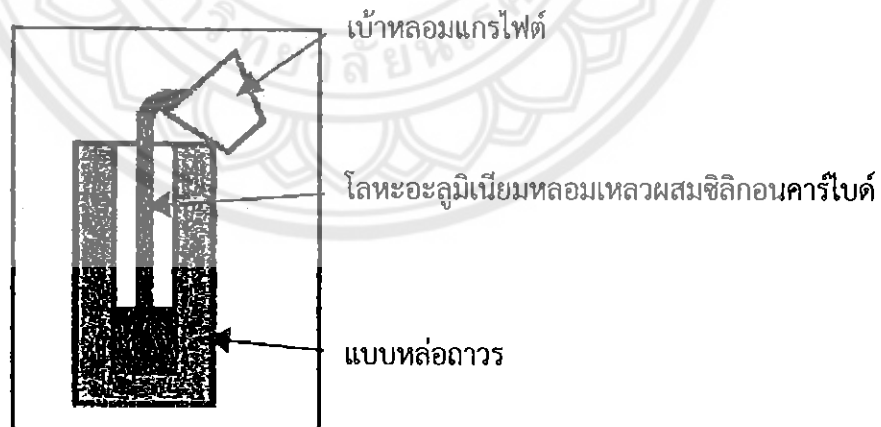
3.3.3.1 นำล้อยแม่กอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ตัดเตรียมไว้มาหลอมจนอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว

3.3.3.2 กวนโลหะหลอมเหลวให้เข้ากันกับซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

3.3.3.3 นำซิลิกอนคาร์ไบด์มาผสมกับน้ำโลหะหลอมเหลว

3.3.3.4 เทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อถาวรที่เตรียมไว้ แสดงรูปที่ 3.3 โดยทำการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิที่ 680 องศาเซลเซียส

3.3.3.5 แกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อ



รูปที่ 3.3 การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

3.3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงาน

3.3.4.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างจุลภาคดังนี้

ก. นำชิ้นงานที่ได้ไปทำการขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

ข. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาขัดโดยละเอียดโดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 1.0 ไมครอน

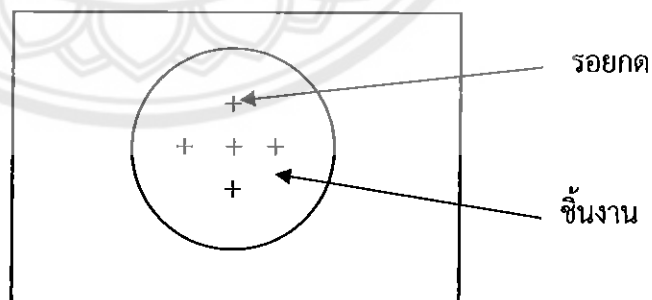
ค. นำชิ้นงานที่ขัดละเอียดมากัดกรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ในน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยจุ่มชิ้นงานลงในกรดล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ดและเป่าให้แห้ง

ง. นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดแล้วมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

3.3.4.2 การวัดค่าความแข็ง

ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600 และ 800 ตามลำดับ

ข. นำชิ้นงานผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาแล้วไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล โดยใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักทดสอบ 187.5 กิโลกรัมแรง ใช้เวลากด 15 วินาที โดยชิ้นงาน 1 ชิ้น ทำการทดสอบความแข็ง 5 ตำแหน่ง แสดงรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงจุดที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง

3.3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

3.3.5.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง
จุลภาค และความแข็ง

3.3.5.2 นำผลการวิเคราะห์มาศึกษาหาข้อสรุป

3.3.5.3 สรุปผลการทดลอง

3.3.5.4 จัดทำรูปเล่มโครงงาน



บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

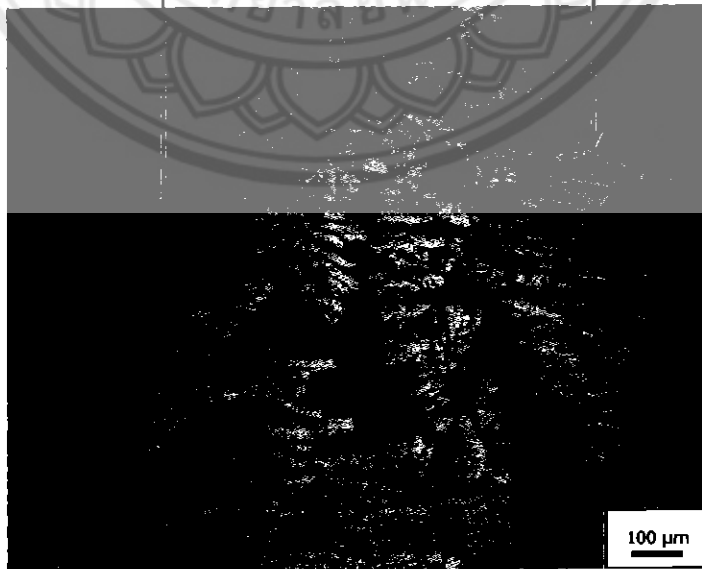
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ อะลูมิเนียมผสม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการผลิตด้วยกระบวนการทอหล่อ ซึ่งประกอบด้วย การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผสม และไม่ผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ในร้อยละโดย น้ำหนักที่ต่างกัน เมื่อความเร็วในการทอเท่ากัน แสดงรายละเอียดดังนี้

4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่าน กระบวนการทอหล่อ โดยใช้ความเร็วในการทอ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที เพื่อเป็นการ ควบคุมสภาวะและตัวแปรของชิ้นงาน ที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ และชิ้นงานที่มีการเติม อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีลักษณะโครงสร้าง ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และมีเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม- ซิลิคอนแทรกอยู่ด้านนอกเดนไดรต์ แสดงรูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคในภาพรวมมีความสม่ำเสมอ ใน บางตัวอย่างทดสอบมีการตรวจพบรูพรุนในโครงสร้างบ้างในปริมาณที่น้อยมาก เนื่องจากโลหะผสม อะลูมิเนียมเกรด A356 เป็น โลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอนไฮโปยูเทคติกมีช่วงการแข็งตัวที่กว้าง แสดง รูปที่ 4.2

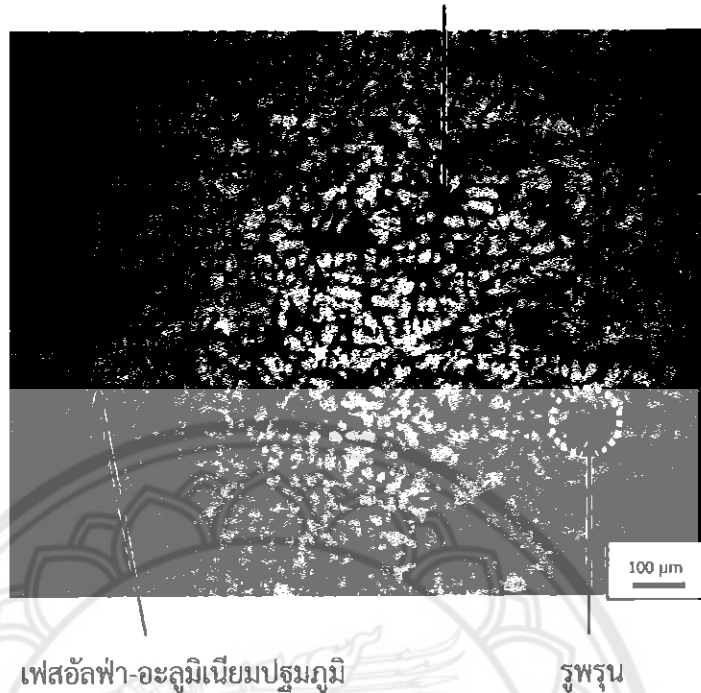
เฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน

เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

เฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน



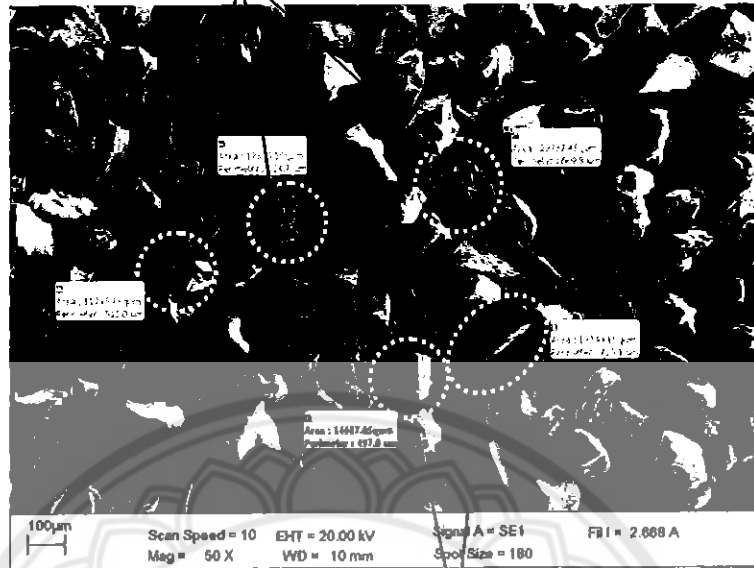
รูปที่ 4.2 รูพรุนที่พบในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

จากโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจพบรูพรุนในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผลิตขึ้นมา อาจเนื่องจากการกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที ทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำโลหะมาก การละลายของแก๊สในบรรยากาศเข้าไปในน้ำโลหะจึงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของภิญฐ และวัชรมนพบว่า ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม่ที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่ใช้อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ไม่พบรูพรุนในชิ้นงานเลย เนื่องจากแบบหล่อถาวรมีความชื้นในแบบหล่อน้อยมาก ทำให้เมื่อเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ความชื้นจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้อยมาก และสามารถระเหยออกจากแบบหล่อได้อย่างรวดเร็ว ไม่ละลายเข้าไปในน้ำโลหะหลอมเหลว จึงไม่พบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงาน

4.2 อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ในการทดลองวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งได้นำอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระดาษทรายเก่ามาใช้ประโยชน์ โดยนำผงมาผ่านการบดและคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้อยู่ในช่วง 100-150 ไมโครเมตร มีลักษณะรูปร่างเป็นแบบ Angular และแบบ Polygonal ปะปนกัน แสดงรูปที่ 4.3

อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์



อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

รูปที่ 4.3 ลักษณะของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

จากการตรวจสอบขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ทำการวัดภาพฉายของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สามารถเห็นอนุภาคได้อย่างชัดเจน เพื่อใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตเพียงตัวเดียว ที่ใช้แสดงถึงขนาดทั้งหมดของอนุภาคนั้น คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโดยตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคเป็นทรงกลม การใช้รูปถ่ายจากกล้อง SEM สามารถนำมาคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้จากสมการ (นภิสพร, 2548)

$$D_A = (4A/\pi)^{1/2} \quad (4.1)$$

โดยที่ D_A คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ภาพฉายทรงกลมเทียบเท่า (m)
 A คือ พื้นที่ภาพฉาย (m²)

ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำสมการดังกล่าวเพื่อมาใช้คำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 133.72 ไมโครเมตร ดังแสดงตารางที่ 4.1 โดยการนำค่าพื้นที่ภาพฉายที่วัดได้ไปแทนค่า A ในสมการ 4.1 ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการคำนวณ และค่าที่ได้จากการวัดขนาดจากการวัดด้วยตะแกรงร่อนมีค่าใกล้เคียงกัน อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้ใน

งานวิจัยครั้งนี้เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของอนุภาคง่ายกว่าขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยการวัดขนาดได้นั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน แสดงตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดพื้นที่ภาพฉาย (Projected Area) และค่า D_A ของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

อนุภาค	พื้นที่ภาพฉาย (μm^2)	เส้นผ่านศูนย์กลางภาพฉายทรงกลม (μm)
1	14687.0	136.78
2	11495.7	121.01
3	18740.1	154.51
4	22787.4	170.38
5	12825.5	127.82
6	14311.1	135.02
7	12157.6	124.45
8	15710.9	141.47
9	7802.4	99.70
10	11603.8	121.58
	เฉลี่ย	133.72

4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์

ผลจากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อ โดยใช้ความเร็วในการกวน ความเร็วในการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที เทที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

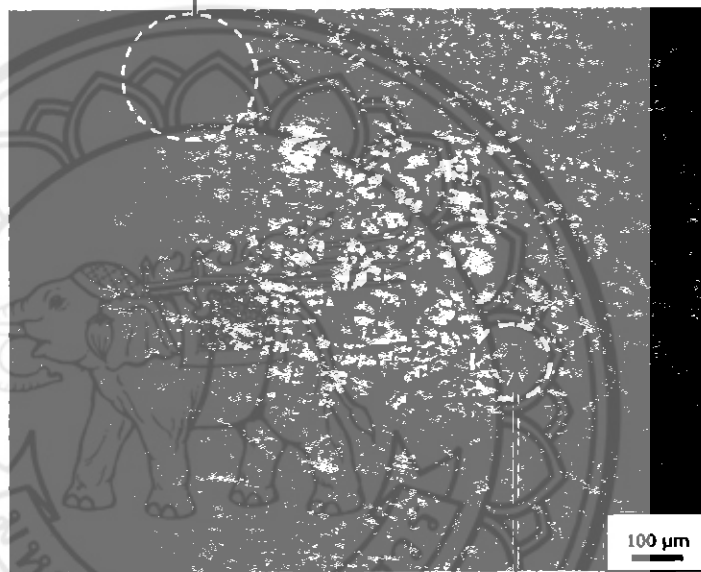
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

สำหรับชิ้นงานตัวอย่างส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วย เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และมีเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแทรกตัวอยู่ระหว่างเดนไดรต์ นอกจากนั้นยังพบหลุมที่มีการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ในบางบริเวณ จากการคำนวณหาสัดส่วนพื้นที่ (Area Fraction) ของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถผสมกับน้ำโลหะได้เพียงประมาณ ร้อยละ 0.26 ร่องรอยการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีลักษณะเป็นหลุมขนาดใหญ่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาค มีลักษณะคล้ายรูพรุน ที่ตรวจพบในโครงสร้างจุลภาค แสดงในรูปแบบที่

4.4 ซึ่งมีขนาดของหลุมที่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดนั้นมีขนาด $137.12 \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางภาพฉายทรงกลมของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่คำนวณมาในตารางที่ 4.1

จากค่า Area Fraction ซึ่งให้เห็นว่ามีการหายไปของอนุภาคที่เติมเข้าไป คาดว่าเนื่องจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์บางอนุภาคที่ไม่มีการเปียกของอนุภาค ในน้ำโลหะ และมีแรงตึงผิวในน้ำโลหะ ส่งผลให้ปริมาณการกระจายตัวที่น้อย จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของรูพรุนเมื่อเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่แทบจะไม่มีรูพรุนแสดงรูปที่ 4.1

หลุมที่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดออก

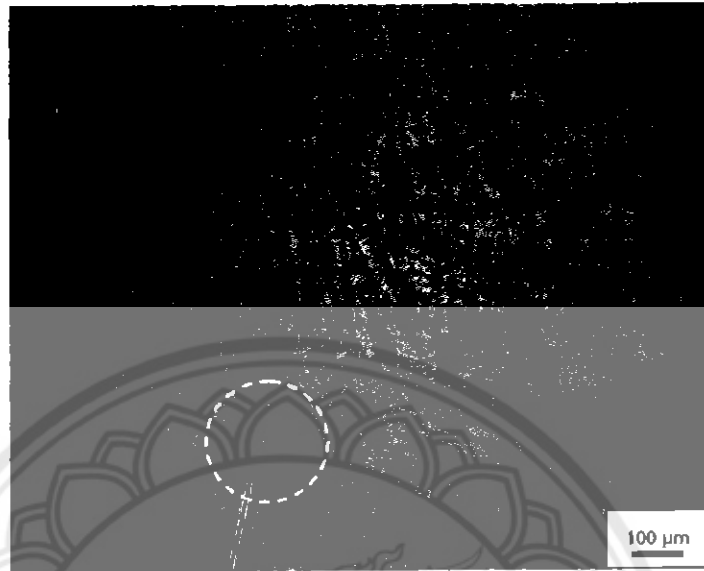


รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

สำหรับตัวอย่างที่เพิ่มส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 1 แสดงรูปที่ 4.5 จากการคำนวณสัดส่วนพื้นที่ (Area Fraction) ของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นร้อยละ 0.47 จากในกรณีก่อนหน้านี้ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีสัดส่วนพื้นที่ของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นร้อยละ 0.26 นอกจากนั้นในโครงสร้างยังพบยังตรวจพบรูพรุน และมีหลุมที่มีการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งมีขนาดของหลุมที่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดนั้นมีขนาด 115.31

ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางภาพฉายทรงกลมของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่คำนวณมา แสดงตารางที่ 4.1

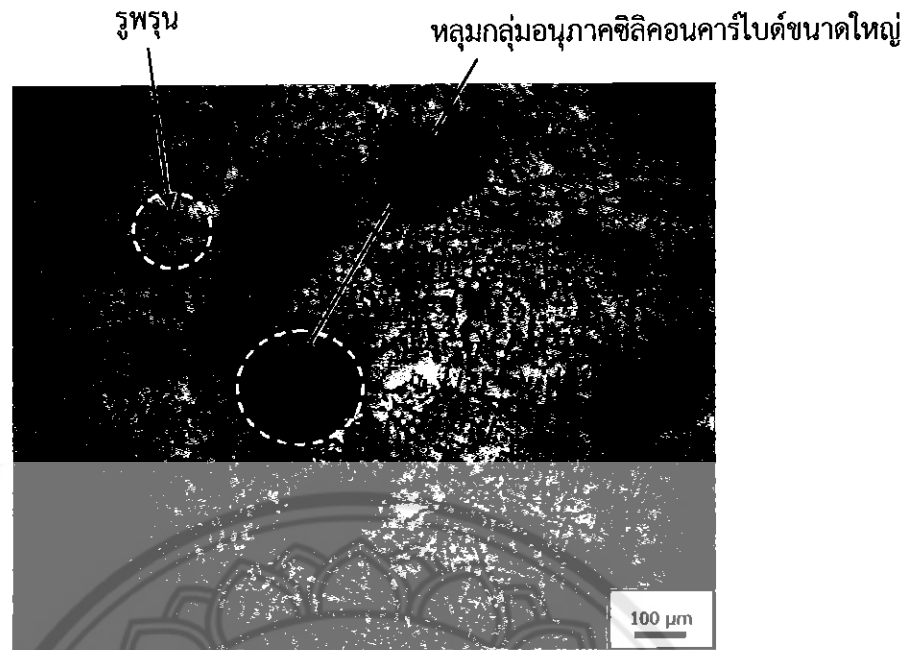


หลุมที่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดออก

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

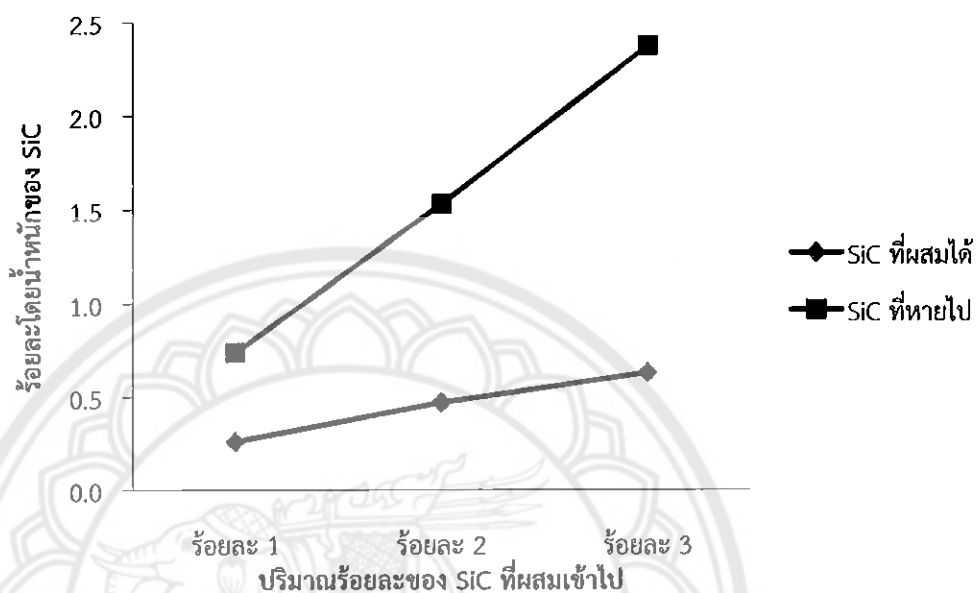
สำหรับตัวอย่างที่เพิ่มส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 2 แสดงรูปที่ 4.6 จากการคำนวณสัดส่วนพื้นที่ (Area Fraction) ของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นร้อยละ 0.63 จากในกรณีก่อนหน้านี้อันที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีสัดส่วนพื้นที่ของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นร้อยละ 0.47 นอกจากนั้นในโครงสร้างยังพบรูพรุน และมีหลุมที่มีการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งมีขนาดของหลุมที่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดนั้นมีขนาด 138.12 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางภาพฉายทรงกลมของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่คำนวณมา แสดงตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณที่ต่างกัน การเพิ่มส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้ปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และค่า Area Fraction เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการคำนวณหาร้อยละของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผสมเข้าไปได้ เทียบกับปริมาณของร้อยละของอนุภาคที่เติมเข้าไป แสดงรูปที่ 4.7 ซึ่งงานวิจัยของ F. Akhlaghi A. Lajevardi and H.M.Maghanaki พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ รูพรุนที่เกิดเนื่องจากการหดตัวของน้ำโลหะระหว่างกระบวนการแข็งตัว และรูพรุนเนื่องจากแก๊ส แต่ในกรณีของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมอนุภาคเสริมแรง (ผงซิลิคอนคาร์ไบด์) อนุภาคเสริมแรงที่เติมลงสู่น้ำโลหะจะเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดรูพรุนทั้งสองประเภทที่กล่าวมา ซึ่งโดยทั่วไปพบว่า ปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมปริมาณผงซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้น เช่นเดียวกับผลการวิจัยในครั้งนี้พบว่าในชิ้นงานที่ไม่มีการเติมอนุภาคเสริมแรงจะพบปริมาตรรูพรุนน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ และลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน แสดงรูปที่ 4.6 พบว่า จะเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟองอากาศ (ขณะทำการกวนในขณะใส่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ลงสู่น้ำโลหะอะลูมิเนียมผสม) ซึ่งปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ สำหรับรูพรุนที่เกิดจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ขณะที่น้ำโลหะผสมเข้าสู่กลไกการแข็งตัวภายในโครงสร้างเริ่มเกิดเดรนไดรท์ของอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกผลักออกมาอยู่บริเวณข้างหน้าเดรนไดรท์ของอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดการสะสมแก๊ส

อนุภาคเสริมแรงอยู่ด้วย จึงเป็นอุปสรรคทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะอะลูมิเนียมเคลื่อนที่ลอยขึ้นสู่วิวหน้าน้ำโลหะ และถูกกำจัดออกได้ค่อนข้างยากกว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ไม่มีการเติมอนุภาคเสริมแรง ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน

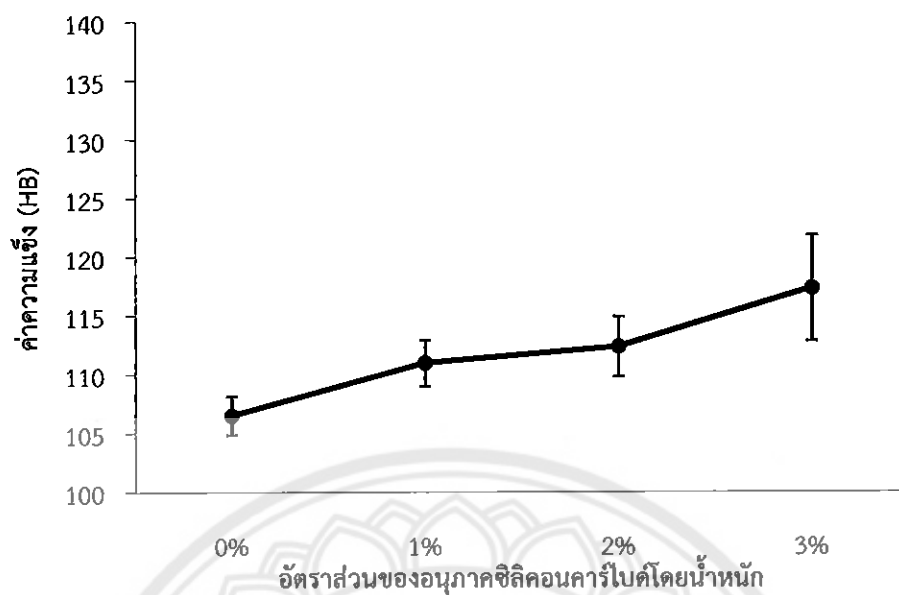


รูปที่ 4.7 ค่าร้อยละของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สามารถผสมเข้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียม

4.4 ความแข็ง

จากการนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งแบบบริเนลพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทวนหล่อ ส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มีความแข็งเฉลี่ย คือ 106.50, 110.95, 112.33 และ 117.28 HB ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า ปริมาณของส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งของวัสดุมีแนวโน้มสูงขึ้น จึงทำให้เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 3 มีค่าความแข็งมากที่สุด และในวัสดุพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่ไม่มีส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่าความแข็งต่ำสุด แสดงรูปที่ 4.8

การที่ค่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น มีผลมาจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรง โดยการกระจายตัวของเฟสที่สองขนาดเล็กในเนื้อพื้น (Fine Particle Strengthening) กระบวนการนี้เป็นการเติมอนุภาคขนาดเล็กเข้าไปโดยตรง โดยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมเข้าไปนี้จะช่วยรับแรงหลักของวัสดุเชิงประกอบทำให้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและอาจจะสร้างวงดิสโลเคชันรอบๆ อนุภาค หรือมีการข้ามอนุภาคไป ซึ่งจำเป็นที่จะต้องให้แรงทางกลเพิ่มขึ้นในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ด้วยเหตุนี้ โลหะผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จึงมีความแข็งแรงกว่าโลหะผสม A356 ที่ไม่เติม



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งที่ผ่านกระบวนการกวนหล่อเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 0, 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก



บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปผลโครงการวิจัย ข้อเสนอแนะ การพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไขปัญหาของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ชิ้นงานที่ไม่เติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในอะลูมิเนียมผสม มีการกวานก่อนเทเข้าแบบหล่อถาวร ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และมีเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแทรกตัวอยู่ระหว่างเดนไดรต์

5.1.2 ชิ้นงานที่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน มีโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และมีเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแทรกตัวอยู่ระหว่างเดนไดรต์ เช่นเดียวกันกับชิ้นงานโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

5.1.3 ชิ้นงานที่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 ในอะลูมิเนียมผสม พบรูพรุน หลุมที่มีการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ และค่าความแข็ง ที่มีเพิ่มขึ้น ตามปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมเข้าไปในโลหะผสมอะลูมิเนียม

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 จากการศึกษา และทดลองอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เพื่อเพิ่มความแข็ง การเพิ่มปริมาณส่วนเสริมแรงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

5.2.2 ในน้ำโลหะที่มีแรงตึงผิวมาก ส่งผลให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่เปียกในน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม หากต้องการเพิ่มการเปียกผิวให้กับอนุภาคสามารถเติมแมกนีเซียมเพื่อลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะได้

5.2.3 จากการศึกษาขนาดของอนุภาคส่งผลต่อสมบัติของเนื้อพื้น จึงควรใช้ขนาดส่วนเสริมด้วยอนุภาคที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มสมบัติที่ดีต่อชิ้นงานได้

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 เนื่องจากในการกวานน้ำโลหะทำให้อุณหภูมิมีการลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงควรมีการวางแผนในการปฏิบัติงานของแต่ละคนให้ดีเพื่อไม่ให้อุณหภูมิเทต่ำเกินไป

5.3.2 ควรมีการทำความสะดวกกับแบบหล่อถาวรก่อนการเททุกครั้ง เพื่อให้เศษ หรือวัสดุอื่นอยู่ในแบบหล่อ เพราะจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของชิ้นงาน

5.3.3 เนื่องจากในการปฏิบัติงานมีโอกาสเกิดอันตรายจากอุณหภูมิสูง จึงควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันความร้อน เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายขณะปฏิบัติงาน

5.3.4 การตัดชิ้นงานทดสอบควรใช้เครื่องมือตัดที่ทำให้เกิดความร้อนต่ำๆ เพื่อไม่ให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง

5.3.5 การวัดความแข็งแบบบริเนลควรตรวจสอบหัวกด และการวางชิ้นงานทดสอบ เพื่อค่าความแข็งที่ถูกต้อง แม่นยำ



เอกสารอ้างอิง

- จิตติ รินเสนา. (2551). การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น. จังหวัด นครราชสีมา. สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชวลิต เชียงกุล. (2542). โลหะวิทยา. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช รุติเกียรติพงศ์. (2529). วัสดุในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- เขาวลิต ลิ้มณวีจิตร. (2551). โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ. สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2555, จาก <http://www.cemct.net/web/images/storie//alsi001.Pdf>.
- รูปนีย์ อุดมผล. (2551). การทดสอบความแข็ง (Hardness Test). สืบค้นเมื่อ 16 สิงหาคม 2555, จาก http://www.rmutphysics.com/charud/PDFlearning/2learning/2//../1Material_Properties.pdf.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2553). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- นภิสพร มีมงคล. (2548). โลหะกรรมวัสดุผง. สงขลา. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ และศุภกาญจน์ คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประตูลูก ระดับจุลภาค. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.
- มนัส สติรจินดา. (2543). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันพัฒนาวิชาชีพ สวทช. (2539). การคัดเลือกวัสดุ และออกแบบ. สืบค้นเมื่อ 17 สิงหาคม 2555, จาก <http://www.qlickbranding.com/learn/chap8/02.html>.
- สุภาสินี ลิ้มปานานภาพ. (2554). เอกสารประกอบการสอนวิชา 315205 วัสดุศาสตร์ขั้นแนะนำ Introduction Material Science. ขอนแก่น : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุรียา โชคสวัสดิ์. (2553). Engineering Materials. สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2556, จาก <http://www.eng.ubu.ac.th/~ie/metrial/.../c4%20strengthening%20Mechnism.p...>
- สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2542). คุณสมบัติเซรามิก. เอกสารประกอบการสอนวิชา 506201 Introduction to ceramics ประจำภาคการศึกษาที่ 1/2543. นครราชสีมา : สาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทฤทท์ กิรติเสวี (2553). ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2555 จาก http://158.108.46.110/journal_th/download.php?name...pdf&file...

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- อภิณัฐ ศรีสุวรรณ และวัชรมน ฉัตรคำแพง. (2554). ผลของอุณหภูมิเทตอโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมของอะลูมิเนียมผสมจากลือแม็ก ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบทรายขึ้นและแบบหล่อถาวร. ในวัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการปริญญาโทการศึกษา ปีการศึกษา 2554 (หน้า 34). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- A. Dehghan Hamedan n, M.Shahmiri (2012). Production of A3561 wt% SiC Nanocomposite by the modified stir casting method, School of Metallurgical and Materials Engineering, Iran university of Science and Technology, P.O. Box. 16765-163, Tehran, Iran.
- Becthai Bangkok Equipment & Chemical Co., Ltd. ก่อตั้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. สืบค้นเมื่อ 26 สิงหาคม 2555, จาก <http://www.sec.psu.ac.th/sem.html>.
- David, J.R., et al. 1993. Aluminum and Aluminum Alloy. ASM International, materials Park Ohio.
- E-book มหาวิทยาลัยรามคำแหง. (2001). สมบัติทางกลของโลหะ. สืบค้นเมื่อ 1 มีนาคม 2556, จาก [book.ram.edu/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-1.pdf](http://book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-1.pdf).
- F. Akhlaghi, A. Lajevardi, H.M. Maghanaki, Effects of casting temperature on the microstructure and wear resistance of compocast A356/SiCp composites: A comparison between SS and SL routes. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2556, จาก <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360400737X>.
- German, R.M. (1994). Powder metallurgy science. (2nd ed). Princeton, N.J. : Metal powder industries federation.
- G.Ramu, Ranji Bauri. (2009). Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on microstructure and properties of Al-SiC_p composites. สืบค้นเมื่อ 26 สิงหาคม 2555, จาก <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909000934>.
- Hong Min Guo, al. (2009). Materials Science Forum. Search 27 August 2012, From. www.scientific.net/MSF.628-629.477.
- J. Hashim, a al, (1999). Metal Matrix Comsite : Production By The Stir Casting Method. Journal of Material Processing Tecnology.
- Rawlings, R.D. and Matthew, F.L. (2001). Composite Material Engineering and Science, Oxford, England: The Alden press

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

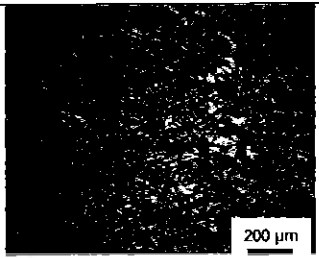
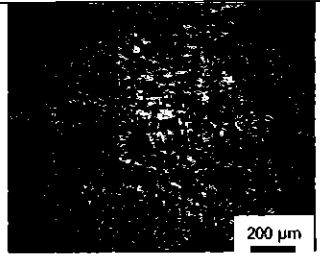
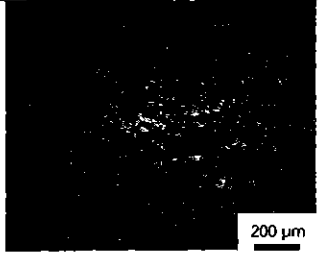
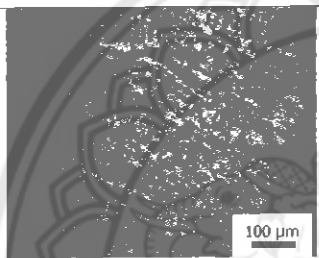
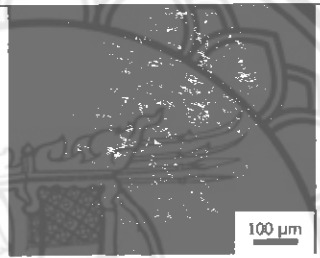
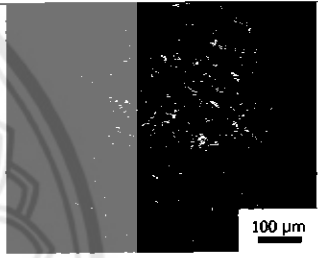
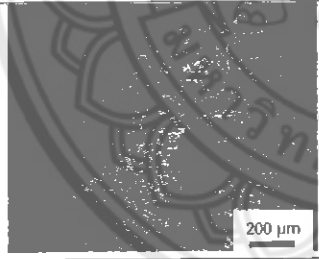
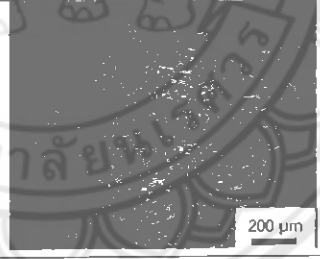
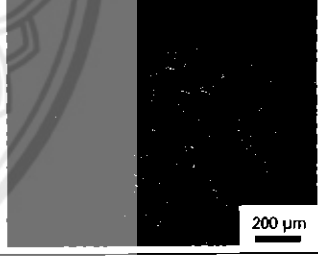
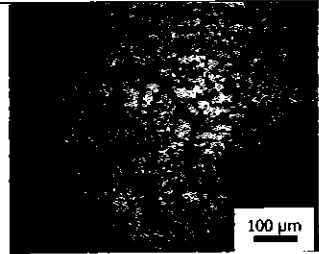
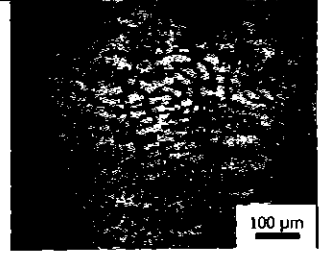
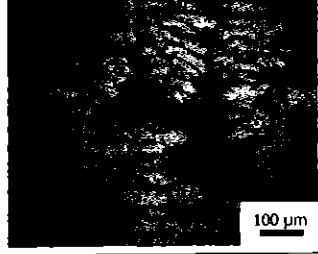
- Sukangkana Lee. (2553). **Industrial Materials Testing**. สืบค้นเมื่อ 28 สิงหาคม 2555, จาก <http://www.eng.ubu.ac.th/~ie/metrial/.../บทที่%209%20Hardness.ppt>
- S. AMIRKHANLOU, B. NIROUMAND (2010). **Synthesis and characterization of Al A356-SiC_p composites by stir casting and compocasting methods**. Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 841583111, Iran
- 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. Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- Yougui Liao. (2007). **Particle Electron Microscopy and Database**. สืบค้นเมื่อ 1 มีนาคม 2556, จาก <http://www.globalsino.com/EM/page2218.html>.



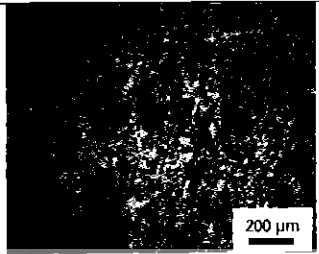
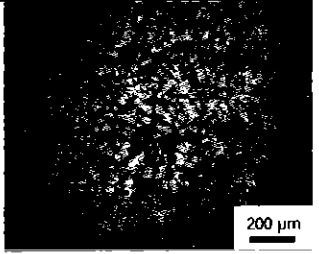
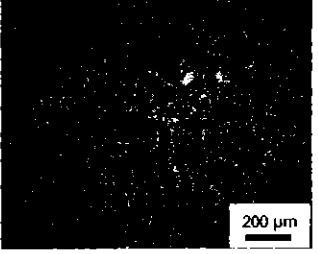
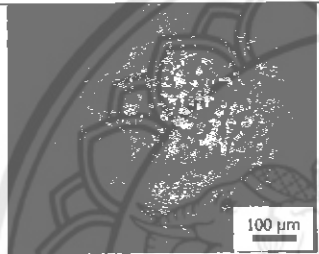
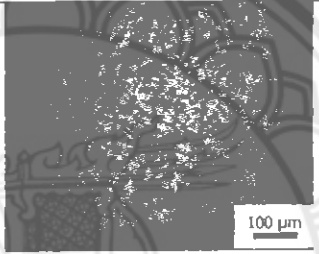
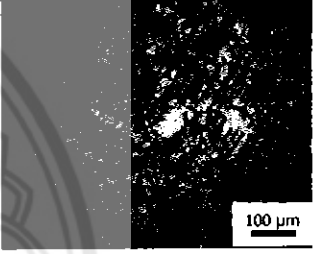
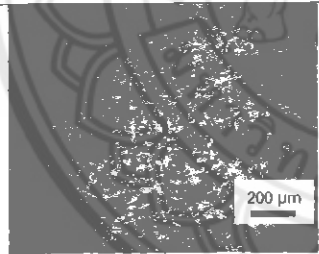
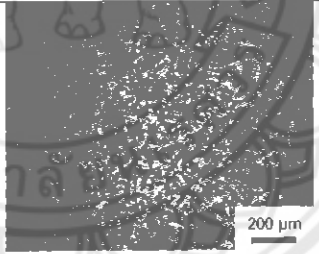
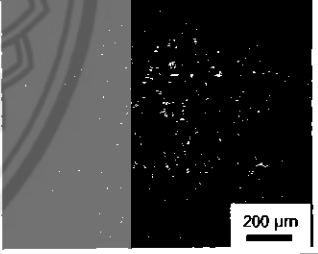
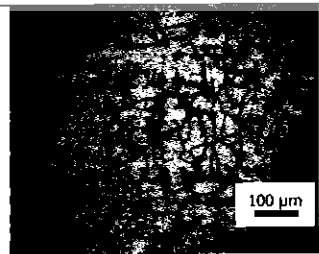
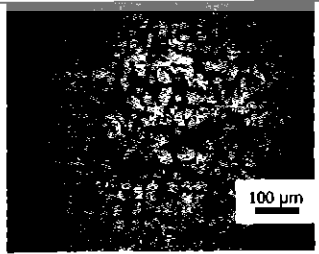
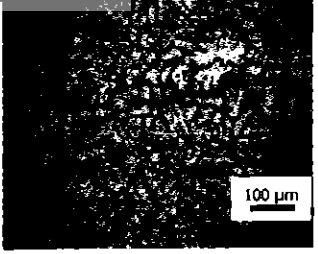
ภาคผนวก ก
โครงสร้างจุลภาคของงานที่ส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์
ร้อยละ 0, 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก



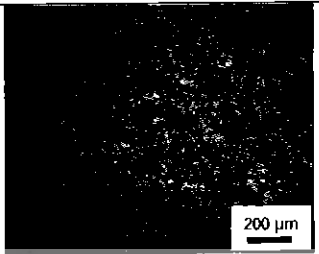
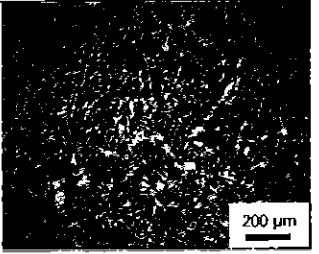
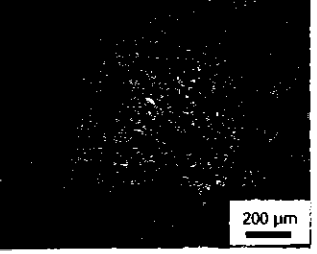
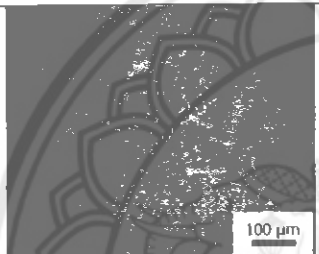
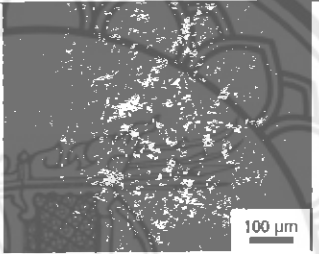
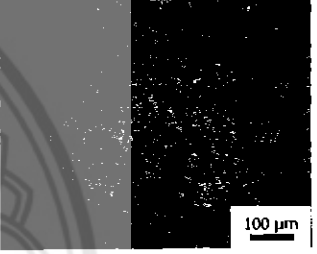
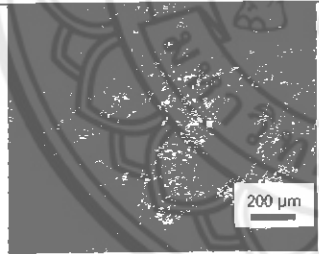
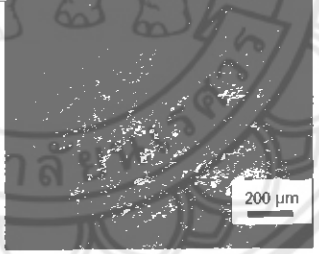
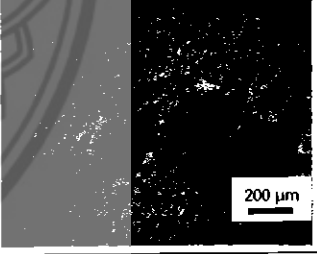
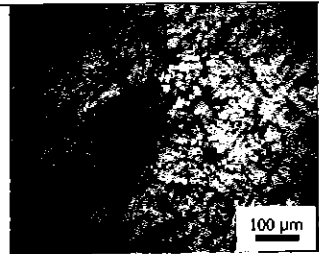


ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ชั้นที่ 1	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชั้นที่ 2	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			

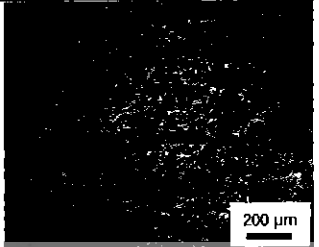
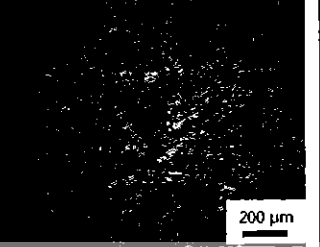
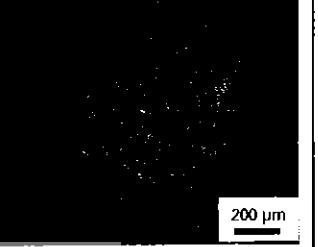
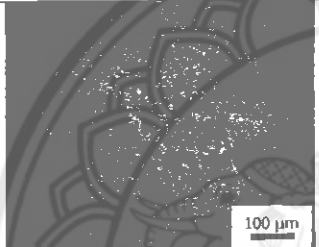
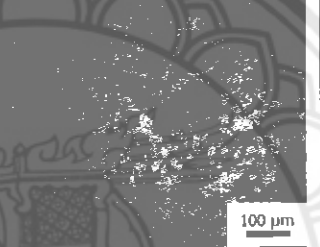
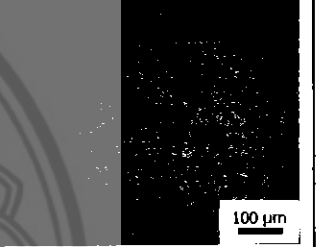
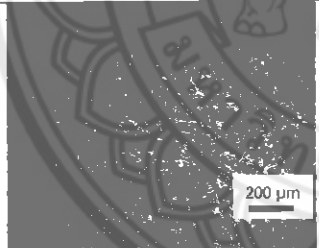
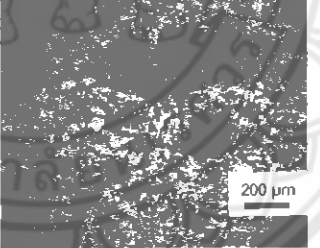
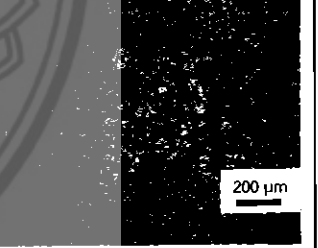
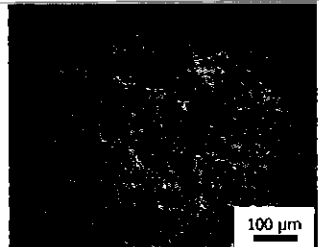
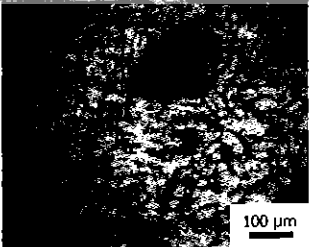
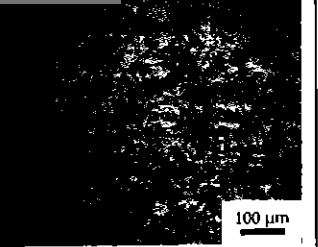
ตารางที่ ก.1 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ชั้นที่ 3	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชั้นที่ 4	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			

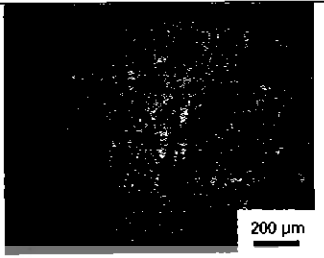
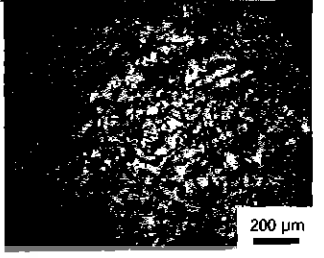
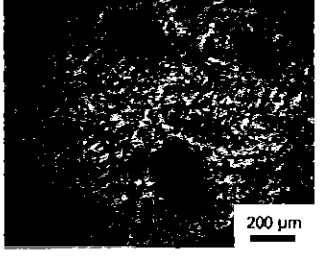
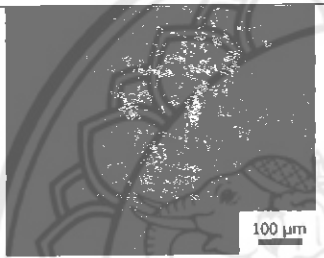
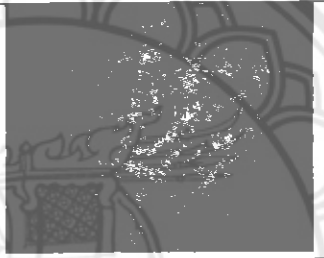
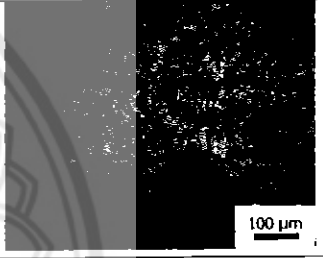
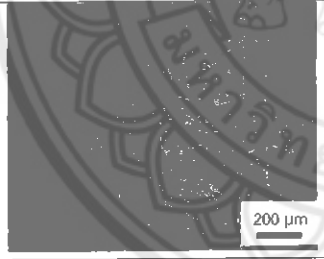
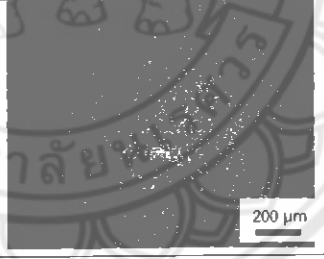
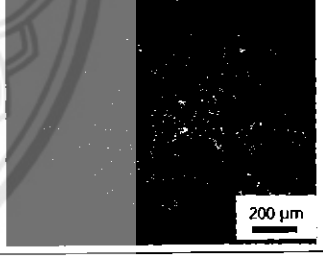
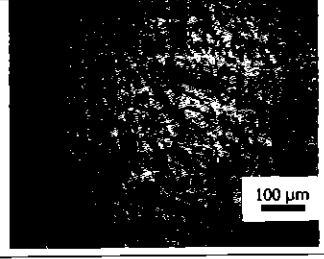
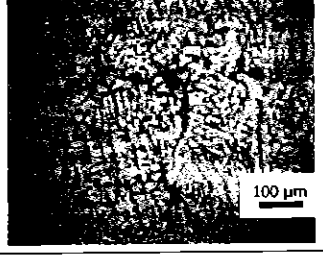
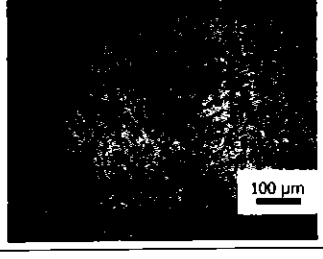
ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 1
โดยน้ำหนัก

ชั้นที่ 1	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชั้นที่ 2	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			

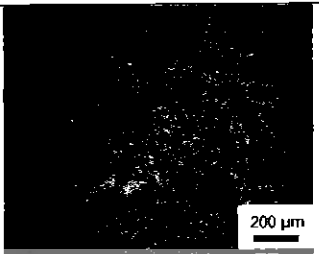
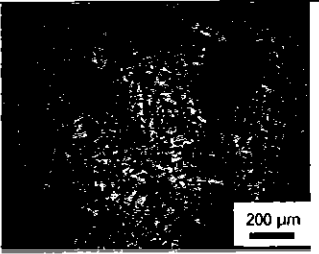
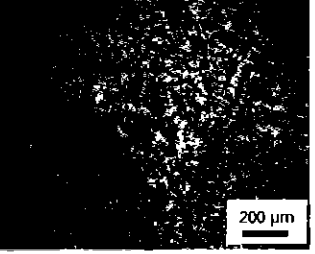
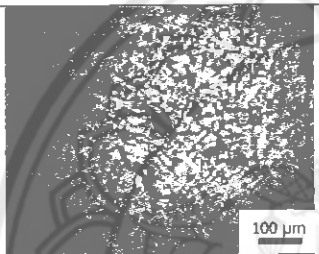
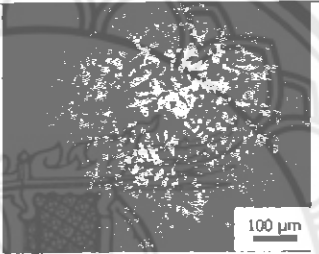
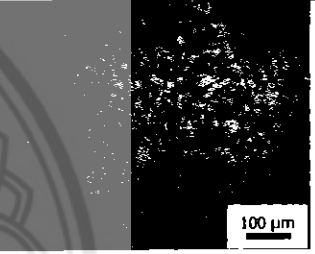
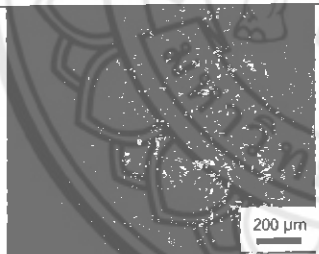
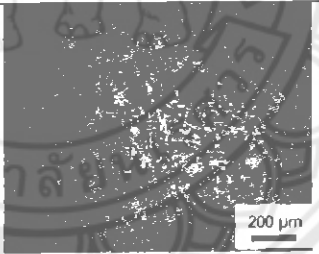
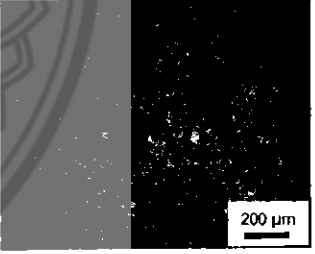
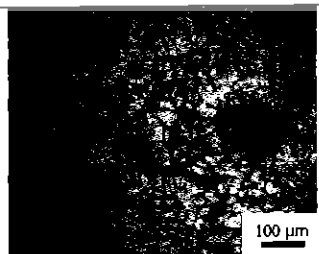
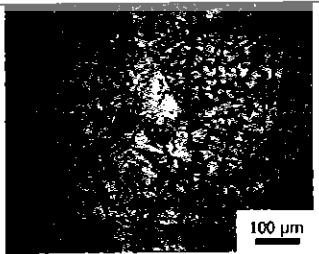
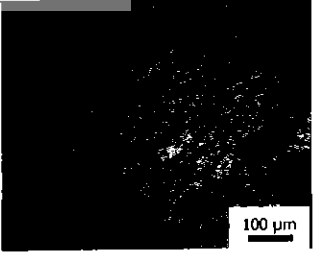
ตารางที่ ก.2 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ชั้นที่ 3	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชั้นที่ 4	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			

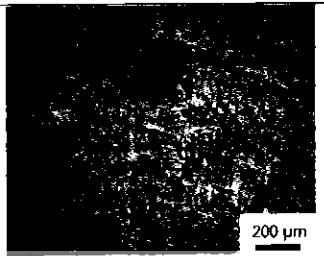
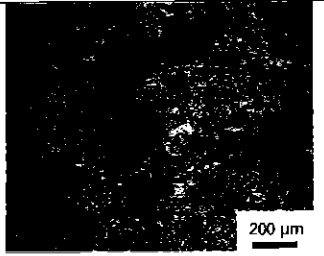
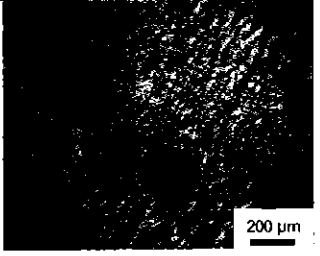
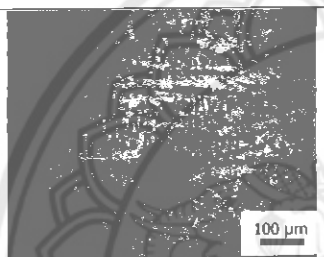
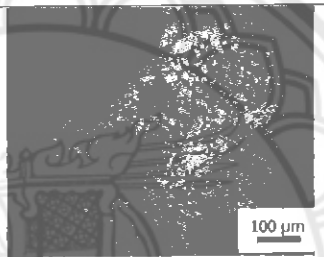
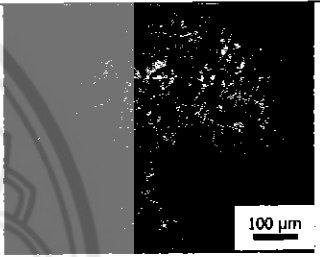
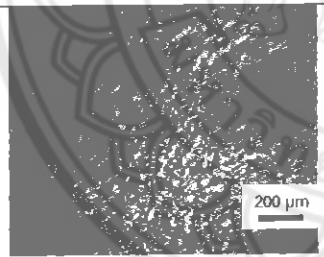
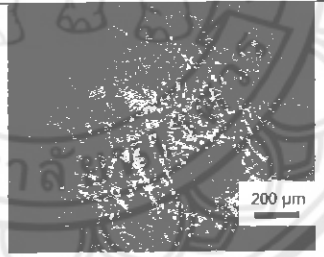
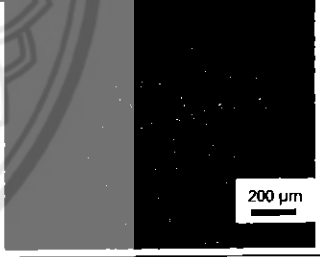
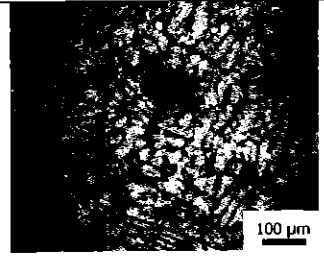
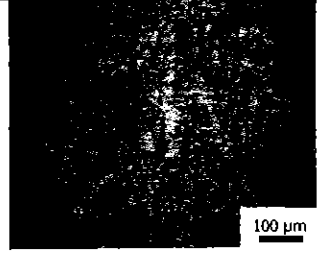
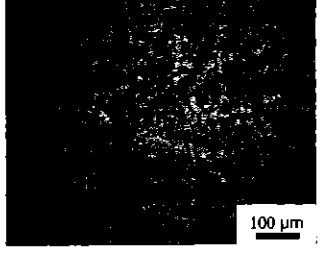
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 2
โดยน้ำหนัก

ชั้นที่ 1	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	200 μm	200 μm	200 μm
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
100 μm	100 μm	100 μm	
ชั้นที่ 2	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	200 μm	200 μm	200 μm
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
100 μm	100 μm	100 μm	

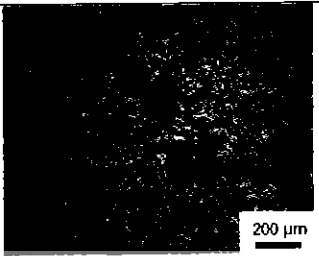
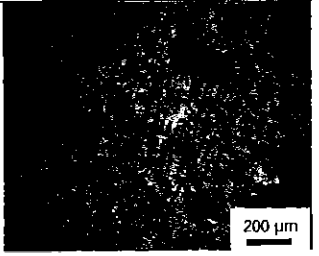
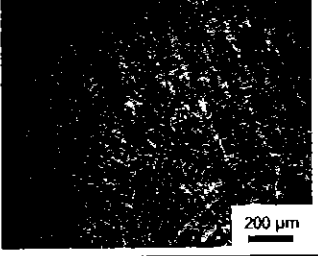
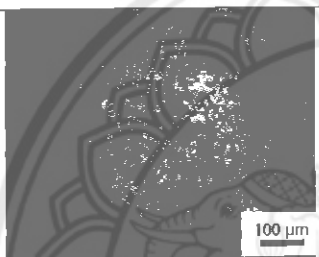
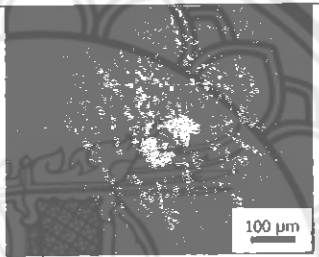
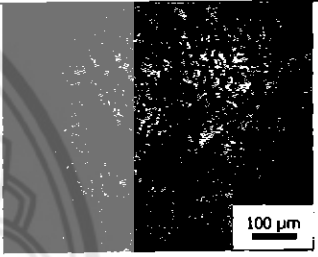
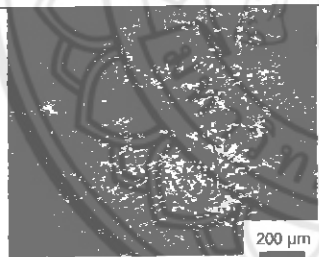
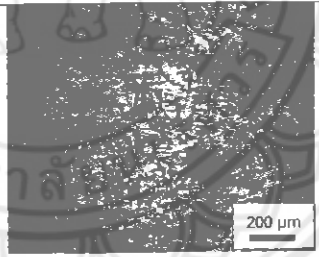
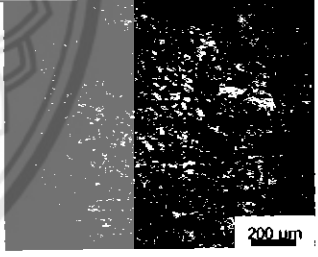
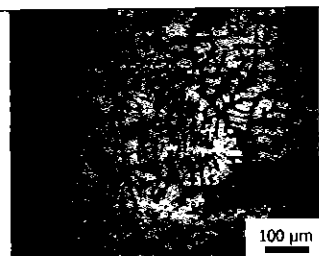
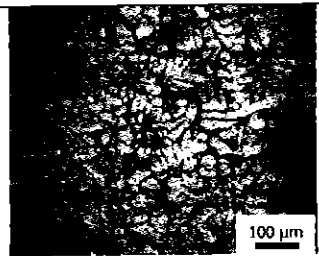
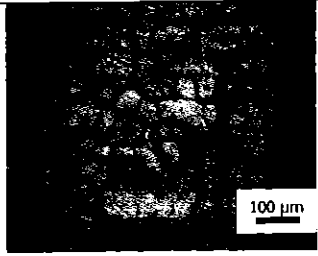
ตารางที่ ก.3 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ชั้นที่ 3	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชั้นที่ 4	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			

ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของชั้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

		กำลังขยาย 50 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
ชั้นที่ 1				
		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
ชั้นที่ 2		กำลังขยาย 50 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมส่วนเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ชั้นที่ 3	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชั้นที่ 4	กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			

ภาคผนวก ข
ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมผสมสแตนเสริมแรงด้วย
ซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก



ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมผสมส่วนเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก 0 ที่ผ่านกระบวนการทอหล่อ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ด้วยแบบหล่อถาวร

ปริมาณซิลิคอน-คาร์ไบด์ ร้อยละ	ตำแหน่ง	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ค่าความแข็ง ทั้งชิ้นงาน (HB)
0	1	105.6027	109.6792	107.6152	111.7964	106.50
	2	107.6152	109.6792	103.6399	107.6152	
	3	107.6152	107.6152	107.6152	107.6152	
	4	92.81835	101.7252	105.6027	103.6399	
	5	107.6152	107.6152	107.6152	109.6792	
1	1	120.8371	113.9688	113.9688	111.7964	110.94
	2	111.7964	111.7964	113.9688	107.6152	
	3	111.7964	113.9688	109.6792	107.6152	
	4	113.9688	116.1983	109.6792	103.6399	
	5	101.7252	105.6027	109.6792	109.6792	
2	1	116.1983	105.6027	116.1983	107.6152	112.33
	2	113.9688	105.6027	111.7964	118.487	
	3	111.7964	116.1983	111.7964	107.6152	
	4	116.1983	111.7964	111.7964	109.6792	
	5	116.1983	105.6027	116.1983	116.1983	
3	1	116.1983	118.487	120.8371	118.487	117.28
	2	113.9688	113.9688	123.2508	120.8371	
	3	113.9688	118.487	123.2508	107.6152	
	4	103.6399	120.8371	103.6399	120.8371	
	5	113.9688	113.9688	120.8371	113.9688	