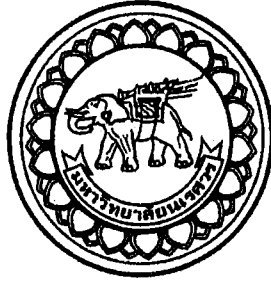


# อภิธาน์นทนาการ



ผลของซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ โลหะผสม  
อะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลิตโดยกระบวนการกวนหล่อ  
EFFECT OF SILICON CARBIDE ON MICROSTRUCTURE OF  
ALUMINIUM ALLOY/SILICON CARBIDE COMPOSITE PRODUCED BY STIR  
CASTING PROCESS

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
วันลงทะเบียน..... 18 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 6318698
เลขเรียกหนังสือ..... ป. 18.9

ศบ  
สวทศ

นายสรรค์	เวียงบาล	รหัส	49364769	2๕๕5
นายปฤษฎา	เครือเตจ๊ะ	รหัส	52363370	
นายอนิรุติ	จิตตรง	รหัส	52363592	

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
ปีการศึกษา 2555



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	ผลของซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลิตโดยวิธีการกวนหล่อ		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายสรรค์	เวียงบาล	รหัส 49364769
	นายปฤษฎา	เครือเต้จ๊ะ	รหัส 52363370
	นายอนิรุติ	จิตตรง	รหัส 52363592
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2555		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....  
.....ที่ปรึกษาโครงการงาน  
(อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ฤชณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันส์มฤทธิ)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	ผลของซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลิตโดยวิธีการกวนหล่อ		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายสรรค	เวียงบาล	รหัส 49364769
	นายฤษฏา	เครือเต้จ๊ะ	รหัส 52363370
	นายอนิรุติ	จิตตรง	รหัส 52363592
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2555		

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงสู่แม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 690 องศาเซลเซียส โดยใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นส่วนเสริมแรง และทำการกวนหล่อ (Stir Casting) ก่อนการเทน้ำโลหะ โดยมี การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบในการกวน และใช้ความเร็วรอบ 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งผ่านการกวนหล่อที่อุณหภูมิเท่ากัน และส่วนผสมเท่ากัน จากการทดลองพบว่า โครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และพบหลุมที่เกิดจากการหลุดของซิลิคอนคาร์ไบด์ และเมื่อใช้ความเร็วรอบที่ 490 รอบต่อนาที จะมีความแข็งแรง 122.541 HB ซึ่งมีความแข็งแรงสูงสุด

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการ และ อาจารย์มานะ วีระวิกรม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่าง ๆ ตลอดจนแนะนำวิธีในการแก้ปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา จนสามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และอาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอนโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชูลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำงานรวมถึงการแนะนำการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างถูกต้อง

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นสถานที่ในการศึกษาหาความรู้ให้กับผู้ทำโครงการ จนลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาคารปฏิบัติการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่เป็นสถานที่ใช้เตาหลอม กล้องจุลทรรศน์แสง และเครื่องมือต่าง ๆ ภายในอาคาร จนงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่าย และกำลังใจ จนสามารถศึกษา ทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายสรรค์ เวียงบาล

นายปฤษฎา เครือเต๊ะจ๊ะ

นายอนิรุติ จิตตรง

มีนาคม 2555

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output) .....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome) .....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ (Gantt Chart).....	2
<b>บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....</b>	<b>4</b>
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม (Introduction to Aluminium).....	4
2.2 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials).....	9
2.3 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification).....	10
2.4 กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting).....	19
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ.....	20
2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing).....	24
2.7 การเปียกผิว (Wettability).....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>31</b>
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ.....	31
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์.....	32
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	37
4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	37
4.2 รูปร่างของชิ้นงานหล่อ.....	37
4.3 โครงสร้างจุลภาค.....	39
4.4 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	42
4.5 ความแข็ง.....	43
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 บทสรุป.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	45
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก ก.....	49
ภาคผนวก ข.....	52
ภาคผนวก ค.....	58
ภาคผนวก ง.....	61
ภาคผนวก จ.....	64
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	66

## สารบัญตาราง

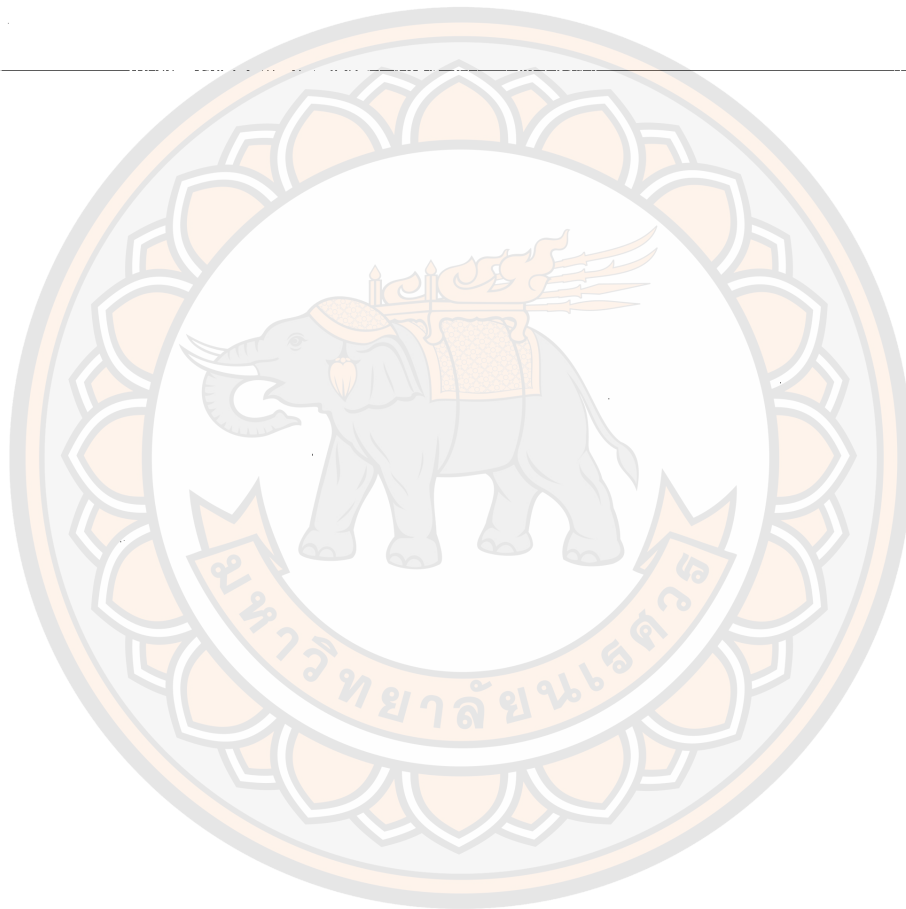
ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ (Gantt Chart).....	2
2.1 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ.....	5
2.2 สมบัติทางกล และทางกายภาพที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค.....	10
2.3 ค่าของอุณหภูมิของจุดเยือกแข็ง ความร้อนของการหลอมเหลว พลังงานเชิงพื้นผิว และ ค่า undercooling สูงสุดสำหรับโลหะบางชนิด.....	12
2.4 แสดงมุมสัมผัสค่าต่างๆ และปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง.....	27
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356.....	32
ก.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศา- เซลเซียส.....	50
ข.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 และรูพรุนที่เกิดจากการหลุด ออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวนด้วยความเร็ว 210 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส.....	53
ข.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 และรูพรุนที่เกิดจากการหลุด ออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวนด้วยความเร็ว 340 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส.....	54
ข.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 และรูพรุนที่เกิดจากการหลุด ออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวนด้วยความเร็ว 490 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส.....	56
ค.1 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่ผ่านการกวนด้วย ความเร็ว 210 รอบต่อนาที.....	59
ค.2 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่ผ่านการกวนด้วย ความเร็ว 340 รอบต่อนาที.....	59
ค.3 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่ผ่านการกวนด้วย ความเร็ว 490 รอบต่อนาที.....	60
ง.1 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	62
ง.2 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	63
จ.1 พื้นที่ภาพถ่ายของหลุมที่เกิดจากการหลุดออกของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการกวนด้วย ความเร็วกวนต่าง ๆ.....	65

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียมกับซิลิคอน.....5
2.2	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก.....6
2.3	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก.....7
2.4	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก.....7
2.5	ส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate Composites).....9
2.6	ลักษณะต่างๆของการแข็งตัวของโลหะ.....11
2.7	กลไกการเกิดผลึก.....11
2.8	พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta G$ ).....12
2.9	การเกิดนิวคลีไอแบบวิวิธพันธ์ของของแข็งบนสารก่อเกิดนิวคลีไอ.....14
2.10	การเติบโตแบบระนาบ (Planar Growth).....15
2.11	การเกิดเดนไดรต์.....15
2.12	เดนไดรต์ในอะลูมิเนียมผสม (ภาพขยาย 50 เท่า).....16
2.13	ขั้นตอนการเกิดผลึก.....16
2.14	การหดตัว (Shrinkage).....18
2.15	การหดตัวระหว่างเดนไดรต์.....18
2.16	ตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดรูพรุน.....19
2.17	การสะท้อนของแสงจากพื้นผิวโลหะที่ถูกขัด.....21
2.18	กล้องจุลทรรศน์แสง.....22
2.19	ลักษณะภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แสง.....23
2.20	ลักษณะภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....23
2.21	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....24
2.22	การทดสอบความแข็งแบบบริเนล.....26
2.23	มุมสัมผัสของการเปียกผิว.....27
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....31
3.2	ลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียม เกรด A356.....33
3.3	แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold).....34
3.4	ลักษณะการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร.....35
3.5	ชิ้นงานทดสอบ.....36
3.6	ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง.....36
4.1	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็ก- ตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....37
4.2	แท่งอินกอต (Ingot).....38
4.3	รูพรุนภายในชิ้นงานทดสอบที่พบหลังจากเทลงสู่แม่พิมพ์ถาวร.....38
4.4	โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356.....39
4.5	โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วกวาน 210 รอบต่อนาที.....40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วการกวาน 340 รอบต่อนาที.....	41
4.7 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วการกวาน 490 รอบต่อนาที.....	42
4.8 ปริมาณอนุภาคในชิ้นงานหล่อที่ใช้ความเร็วในการกวาน 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที.....	42
4.9 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการกวานหล่อด้วยความเร็วการกวาน 0, 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที.....	44



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีสมบัติเด่นต่าง ๆ มากมายที่เหมาะสมต่อการใช้งานทางด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ ( $2.70 \text{ g/cm}^3$ ) สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เป็นพิษ ดังนั้นจึงมักถูกใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร เป็นต้น เนื่องจากอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา และนำไฟฟ้าได้ดีจึงนิยมนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น จากการที่อะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นต่าง ๆ มากมายเช่นนี้ และยังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่นจึงทำให้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุโลหะที่นิยมใช้อย่างมากในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันอะลูมิเนียมที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมมีการพัฒนา และปรับปรุงทางด้านสมบัติทางกล ดังนั้นนิยมใช้วัสดุหลักของแต่ละกลุ่มมาผสมกันเพื่อให้เกิดวัสดุใหม่ที่เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) ซึ่งจะทำให้ได้สมบัติใหม่ที่ดีขึ้น หรือตรงกับความต้องการ วัสดุเชิงประกอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นเนื้อพื้น หรือส่วนที่ต่อเนื่อง (Matrix) และส่วนเสริมแรงหรือวัสดุกระจาย (Reinforcement) ในการผสมสองส่วนเข้าด้วยกันเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละประเภทมารวมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ ปัญหาที่พบในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพบว่าการกระจายตัวของส่วนเสริมแรงมีผลต่อสมบัติทางกลเช่นกัน จึงมีการพัฒนาวิธีที่จะทำให้การกระจายตัวของส่วนเสริมแรงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอด้วยวิธีการกวนหล่อโดยใช้แรงทางกล (Mechanical Stirring)

สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลิตโดยกระบวนการกวนหล่อที่ส่วนผสมของซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้ความเร็วกวน 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส จากการศึกษาโครงการวิจัยนี้คาดว่าจะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมการผลิตเป็นอย่างมาก

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค ความแข็งของชิ้นงาน ที่ผ่านการกวนหล่อที่อุณหภูมิเท่ากัน มีส่วนผสมเท่ากัน แต่ความเร็วกวนที่แตกต่างกัน

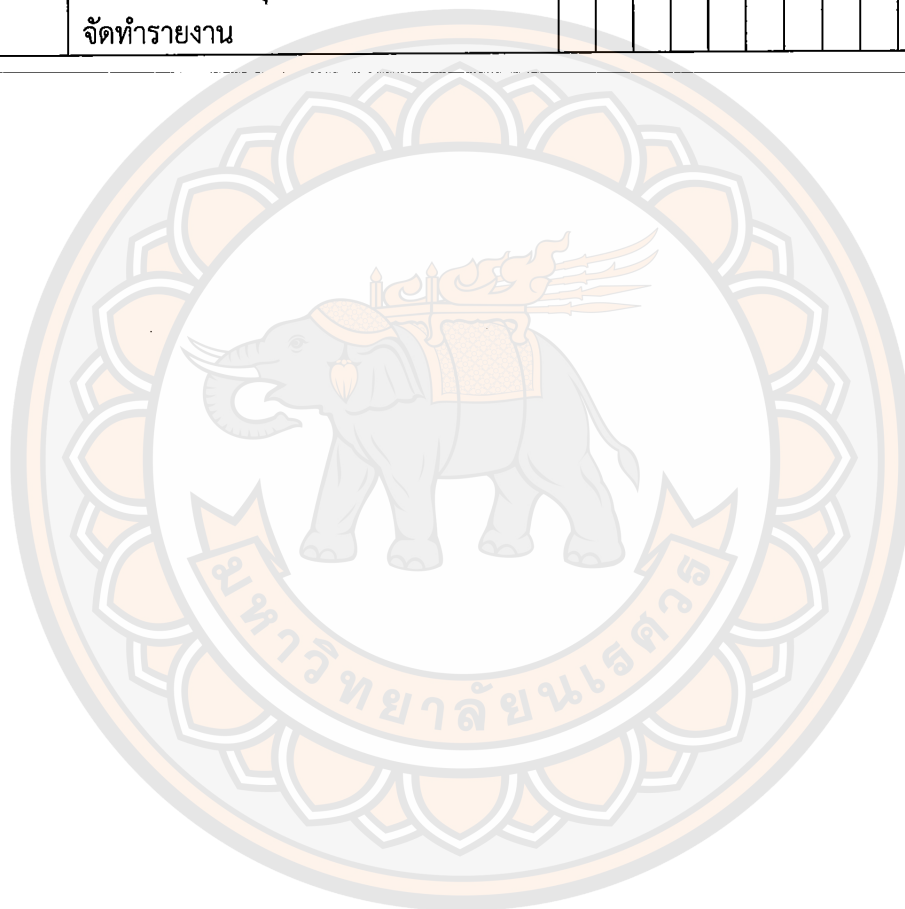
### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ได้ชิ้นงานที่มีโครงสร้างจุลภาค ความแข็งของชิ้นงาน ของวัสดุเชิงประกอบ โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ผ่านการกวนหล่อที่อุณหภูมิเท่ากัน ส่วนผสมเท่ากัน แต่ความเร็วกวนที่แตกต่างกัน



ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ (Gantt Chart)

ลำดับ	การดำเนินงาน	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
3	ทำการทดลองการกวนหล่อ โดยปรับเปลี่ยนความเร็วการกวน				←	→				
4	ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง						←	→		
5	ศึกษาความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล							←	→	
6	วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง พร้อมจัดทำรายงาน								←	→



## บทที่ 2

### หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ปัจจุบันมีโลหะหลายชนิดที่นำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ พบได้จากการนำโลหะมาผลิตเป็นเครื่องอำนวยความสะดวก เครื่องใช้สอยต่าง ๆ หนึ่งในโลหะที่พบมาก หรือใช้ในชีวิตประจำวัน คือ อะลูมิเนียม (Aluminium)

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม (Introduction to Aluminium)

อะลูมิเนียม คือ ธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Al และมีเลขอะตอมเท่ากับ 13 โดยอะลูมิเนียมเป็นโลหะทรานซิชันที่มีลักษณะมันวาว อ่อน และดัดง่าย ในธรรมชาติจะพบอะลูมิเนียมในรูปของสารประกอบออกไซด์เป็นหลัก และมีสมบัติเด่น คือ ด้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี แข็งแรง และเป็นกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) และที่สำคัญได้รับการใช้งานมากที่สุด มีการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย อะลูมิเนียมสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกเป็นอย่างมาก ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอะลูมิเนียมมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน การขนส่ง และการสร้างอาคาร ซึ่งต้องการน้ำหนักเบา แข็งแรง และทนทาน

##### 2.1.1 อะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys)

อะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะได้หลายชนิด เช่น แมกนีเซียม ทองแดง ซิลิกอน สังกะสี และแมงกานีส โลหะที่ผสมกับอะลูมิเนียมเหล่านี้จะช่วยทำให้อะลูมิเนียมมีสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปตามความต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้มีสมบัติทางกลดีขึ้น

##### 2.1.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน

เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม และซิลิกอน แสดงดังรูป 2.1 พบว่าการมีซิลิกอนละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ต่ำสุดที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) ตรงส่วนผสมของซิลิกอนประมาณร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 577 องศาเซลเซียส โดยเรียกโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่มีส่วนผสมทางเคมีที่จุดปฏิกิริยายูเทคติกนี้ว่าเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรดยูเทคติก แต่หากโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนมีปริมาณของซิลิกอนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรดไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) และพบว่าในกรณีที่มีซิลิกอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จึงเรียกว่าเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรดไฮเปอร์ยูเทคติก

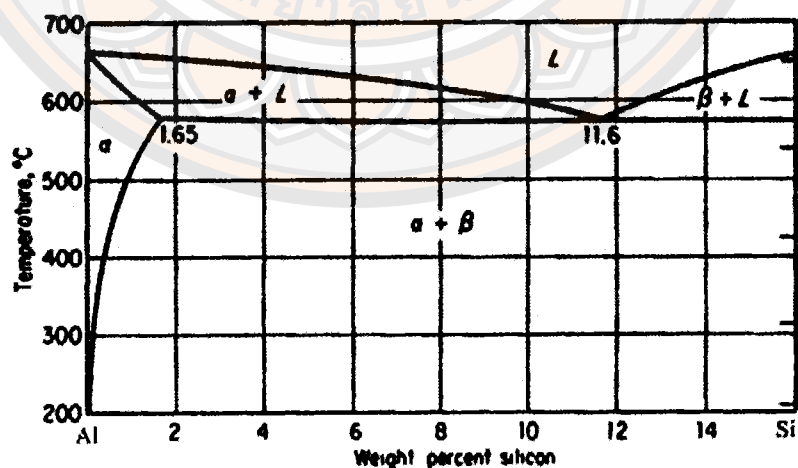
(Hypereutectic) ทั้งนี้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแต่ละเกรดยังมีความต้องการเทคนิคสำหรับปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกัน

นอกจากซิลิคอนซึ่งเป็นธาตุผสมหลักในโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ ยังมีธาตุอื่น ๆ ที่ผสมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ให้ดีขึ้น เช่น การมีแมกนีเซียม ทองแดง และนิกเกิล ในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะช่วยทำให้สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นอกจากนี้แล้วการมีทองแดงผสมในกรณีโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติกช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการกลึงตัด และการนำความร้อน ในขณะที่สูญเสียความเหนียว และการต้านทานการกัดกร่อนไป (เซวาลิต, 2551)

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณ)

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

ที่มา : เซวาลิต (2551)

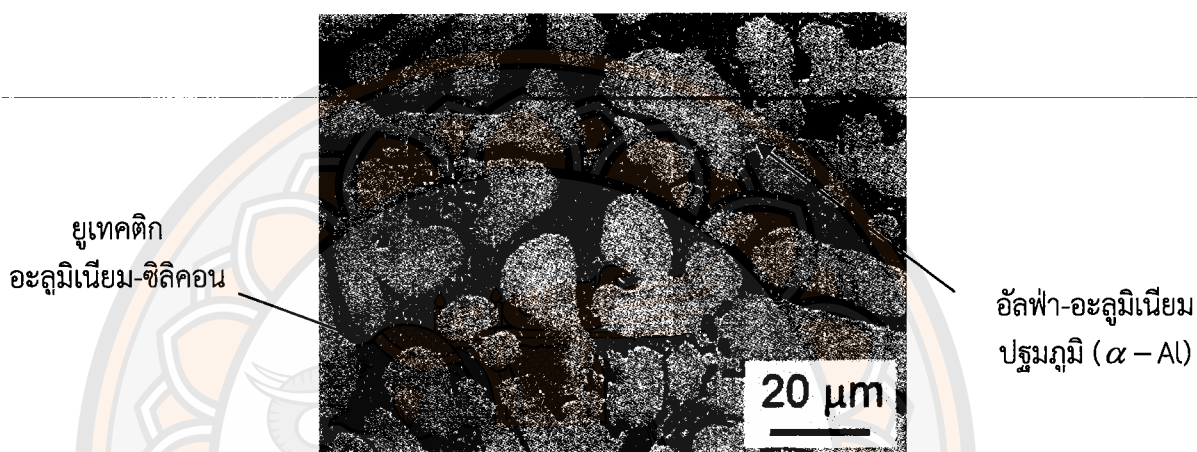


รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียมกับซิลิคอน

ที่มา : เซวาลิต (2542)

### 2.1.2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก

โลหะไฮโปยูเทคติก Al-Si alloy ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนักเนื่องจากข้อจำกัดด้านสมบัติทางกล ดังนั้นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก มักนำมาผสมทองแดง หรือแมกนีเซียม และธาตุอื่นๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้โดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation Hardening) โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเดนไดรท์ของอะลูมิเนียม และยูเทคติกซิลิคอนที่แยกตัวออกมาอยู่ระหว่างเดนไดรท์ และจะเห็นโพรงที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage Pore) กระจายอยู่บ้าง เนื่องจากโลหะผสมไฮโปยูเทคติกมีช่วงการแข็งตัวกว้าง (Wide Freezing Range)

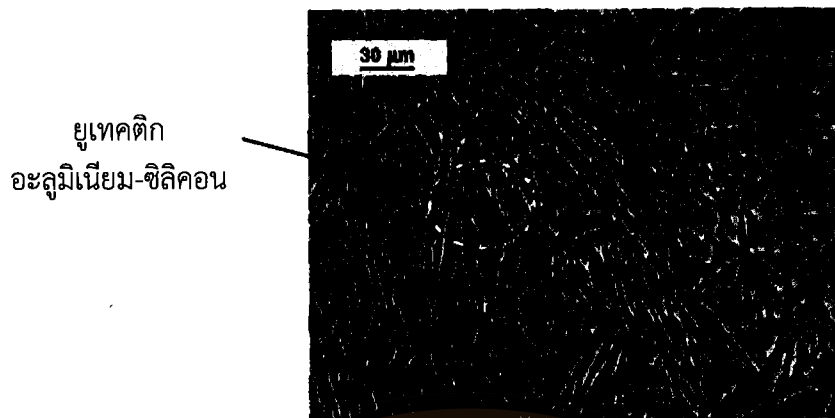


รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก

ที่มา : <http://materials-pisit.blogspot.com>

### 2.1.2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก

โลหะผสมยูเทคติก Al-Si สามารถใช้ได้โดยตรงในลักษณะของโลหะผสมที่อบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงไม่ได้ สามารถผสมธาตุทองแดง และแมกนีเซียม หรือธาตุอื่น ๆ เพื่อให้สามารถเกิดการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Precipitation Hardening) รวมไปถึงการเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน โลหะผสมชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.3 แต่สามารถทำให้โครงสร้างละเอียดได้โดยการตัดแปลงโครงสร้าง เช่น เมื่อหล่อด้วยแบบหล่อทราย หรือแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) โดยการเติมธาตุโซเดียม (Na) หรือ สตรอนเชียม (Sr) ในน้ำโลหะซึ่งผ่านการลดแก๊สแล้วก่อนการเทลงแบบหล่อ ในปริมาณเพียงร้อยละ 0.01-0.015 โดยน้ำหนัก เป็นต้น การทำเช่นนี้เป็นการทำให้จุดยูเทคติกย้ายจากร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก ไปเป็นซิลิคอนร้อยละ 13 เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิคอนปฐมภูมิ (Primary Si) และทำให้เฟสยูเทคติกของซิลิคอนละเอียด แต่โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยวิธีการอัดด้วยความดัน (Pressure Die Casting) ไม่จำเป็นต้องตัดแปลงโครงสร้างในระหว่างการหล่อ เนื่องจากการหล่อแบบนี้อะลูมิเนียมจะเย็นตัวได้เร็ว ทำให้เกรนมีความละเอียดเสมือนการถูกตัดแปลงโครงสร้าง ความละเอียดของเฟสซิลิคอนที่เกิดจากการเย็นตัวเร็ว หรือการถูกตัดแปลง จะช่วยให้ความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียมสูงขึ้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก  
ที่มา : อภินันท์ (2555)

### 2.1.2.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก มีสมบัติด้านการต้านทานการสึกหรออย่างดีเยี่ยม อีกทั้งยังมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ แต่ซิลิคอนปฐุมภูมิที่เกิดขึ้นในโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติกนั้นมีขนาดใหญ่ และมีความแข็งสูง ชิ้นงานจึงมีความเหนียวลดลง ทำให้เปราะเกิดการแตกร้าวภายในชิ้นงานได้ง่าย ซึ่งไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งาน โดยโลหะผสมประเภทนี้ให้โครงสร้างจุลภาคของเฟสซิลิคอนปฐุมภูมิในลักษณะที่ใหญ่ และหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก  
ที่มา : Polmear (1989)

### 2.1.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356

เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 ประกอบด้วยซิลิคอนเป็นธาตุหลัก เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทไฮเปอร์ยูเทคติก และนอกจากซิลิคอนแล้ว มีธาตุอื่น ๆ ที่ผสมเข้าไปเพื่อเพิ่มสมบัติบางประการดังนี้

### 2.1.3.1 ซิลิคอน (Si) ร้อยละ 6.5-7.5 โดยน้ำหนัก

ซิลิคอนที่ผสมอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 ส่งผลให้อะลูมิเนียมหล่อเหลวมีการไหลตัวที่ดีสามารถทำให้ร่องงานในแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนได้ดี และยังคงความแข็งแรงไว้ ทั้งยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อน ลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ถ้ามีในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะ เมื่อได้รับแรงอัด หรือแรงดึง

### 2.1.3.2 แมกนีเซียม (Mg) ร้อยละ 0.30-0.45 โดยน้ำหนัก

แมกนีเซียมมีผลทำให้อะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น และเพิ่มสมบัติกลึง ไส ดัด เจาะ (Machinability) ให้ดีขึ้น แมกนีเซียมเมื่อไปรวมตัวกับซิลิคอนแล้วจะเกิดสารประกอบใหม่ที่เรียกว่า แมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) ถ้ามีในปริมาณน้อยเกินไปจะส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 หลอมได้ยากขึ้น และถ้ามีในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งมากเกินไปอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย

### 2.1.3.3 เหล็ก (Fe) ร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก

จัดเป็นสารมลทินทั้งสิ้นเพราะโลหะหล่อเหลวสามารถละลายเอาเหล็กจากเตาหลอม จากเหล็กกวนน้ำอะลูมิเนียม หรืออื่นๆ เหล็กจะรวมอยู่ในรูปของเหล็ก-อะลูมิเนียม (Fe-Al) และเหล็ก-อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Fe-Al-Si) เป็นเฟสที่ฝังตัวอยู่ในโครงสร้าง ส่งผลทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมมีความเปราะ และไม่ทนต่อการผุกร่อน ถ้ามีในปริมาณน้อยเกินไปจะส่งผลให้การถอดแบบของชิ้นงานนั้นยาก ทำให้ผิวของชิ้นงานนั้นไม่เรียบ และถ้ามีในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้กระบวนการหล่อเกิดการแข็งตัวได้ช้า ทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานต่ำลง

### 2.1.3.4 ไทเทเนียม (Ti) ร้อยละ 0.1-0.15 โดยน้ำหนัก

ไทเทเนียมเป็นสารปรับสภาพให้เกรนมีความละเอียดซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการอบ ไทเทเนียมสามารถละลายเข้าไปยังเนื้อของอะลูมิเนียมทำให้ชิ้นงานหล่อมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

### 2.1.3.5 ธาตุอื่นๆ

ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn), แมงกานีส (Mn) ประมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ธาตุมลทินในอะลูมิเนียมผสมที่ปนเข้าไปส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 มีความเหนียว และความต้านทานต่อการผุกร่อนลดต่ำลง ถ้ามีธาตุดังกล่าวมากเกินไปส่งผลดีต่อชิ้นงานหล่อ เพราะจะทำให้ชิ้นงานมีความบริสุทธิ์ และแสดงถึงการควบคุมการหล่อที่ดี และถ้ามีในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลเสียต่อชิ้นงาน เพราะธาตุเหล่านี้จะไม่เข้าไปแทรกตัว และไม่ละลายเข้ากับอะลูมิเนียมทำให้สมบัติด้านต่าง ๆ เสียไป เช่น มีความแข็งแต่เปราะสูง ทนต่อการผุกร่อนได้ต่ำ และมีความเหนียวลดต่ำลง เป็นต้น

## 2.2 วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)

วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น การทำนาย หรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว

องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก หรือเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) และวัสดุส่วนที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุส่วนที่เป็นเนื้อพื้นนั้นเรียกว่า ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) โดยวัสดุเนื้อพื้นจะทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนเสริมแรง และทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เนื้อพื้น และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ (หฤทัย, 2553)

ประเภทของวัสดุเชิงประกอบอาจถูกแบ่งได้ตามเนื้อพื้นได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (Polymers-Matrix Composite: PMC) กลุ่มที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก (Ceramic-Matrix Composite: CMC) และกลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (Metal-Matrix Composite: MMC)

นอกจากนี้ วัสดุเชิงประกอบอาจจะแบ่งได้ตามลักษณะของตัวเสริมแรง ได้แก่

2.2.1 ส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous Composites)

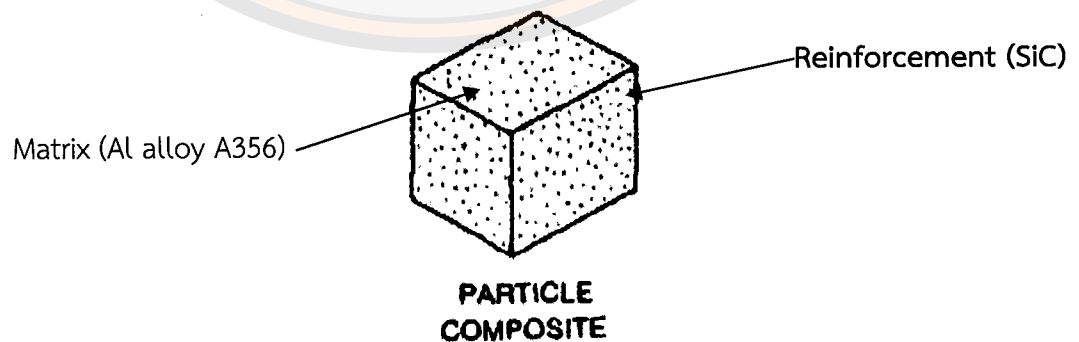
2.2.2 ส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate Composites)

2.2.3 ส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ (Flake Composites)

2.2.4 ส่วนเสริมแรงเป็นสารตัวเติม (Filled Composites)

2.2.5 ส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นชั้น (Laminar or Layered Composites)

เนื่องจากโครงงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 ดังนั้นส่วนเสริมแรงจึงมีลักษณะเป็นอนุภาค แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate Composites)

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, MTEC

### 2.2.2.1 ซิลิคอนคาร์ไบด์

ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นสารประกอบที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีของคาร์บอน และซิลิคอน มันผลิตโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของทราย และคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นสารขัดถูที่ดีเยี่ยม ได้รับการผลิต และนำไปใช้ในงานขัดล้อ และผลิตภัณฑ์ผงขัดอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งร้อยปี ปัจจุบันซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ถูกพัฒนาให้มีเกรดคุณภาพสูงขึ้น โดยมีสมบัติทางกลที่ดีมาก ถูกใช้ในงานขัด งานที่ต้องทนความร้อนสูง งานทางด้านเซรามิก และการประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลและทางกายภาพที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค

Ceramic	Density, g/cm <sup>3</sup>	Elastic modulus		Knoop hardness	Compressive strength		Thermal conductivity		Coefficient of thermal expansion		Specific thermal conductivity, W · m <sup>2</sup> /kg · K
		GPa	10 <sup>6</sup> psi		MPa	ksi	W/m · K	Btu · ft/h · ft <sup>2</sup> · °F	10 <sup>-6</sup> /°K	10 <sup>-6</sup> /°F	
SiC	3.21	430	62.4	2480	2800	406.1	132	76.6	3.4	6.1	41.1
B <sub>4</sub> C	2.52	450	65.3	2800	3000	435.1	29	16.8	5.0	9.0	11.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.92	350	50.8	2000	2500	362.6	32.6	18.9	6.8	12.2	8.3
TiC	4.93	348	50.0	2150	2500	362.6	20.5	11.9	7.4	13.3	4.2

ที่มา : ASM Handbook, Vol. 21

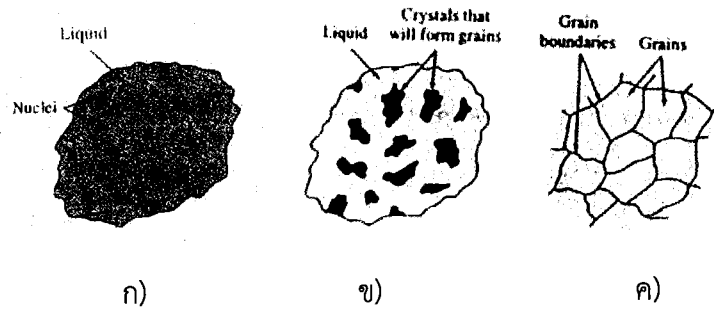
## 2.3 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification)

กระบวนการแข็งตัวของโลหะ หรือโลหะผสมในกระบวนการหล่อโลหะนั้น นับว่ามีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เนื่องจากโลหะส่วนใหญ่จะถูกหลอม และหล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป หรือสำเร็จรูป

การแข็งตัวของโลหะ หมายถึง อะตอมซึ่งเคลื่อนที่อย่างอิสระ ลดการเคลื่อนที่ และจัดเรียงอะตอมเป็นโครงผลึก โดยประกอบด้วยขั้นตอนการเกิดนิวเคลียส และขั้นตอนการเติบโตของผลึก การแข็งตัวของโลหะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุ (แม้น, 2551)

### 2.3.1 การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)

เป็นขั้นตอนการเกิดนิวเคลียส (Nuclei) ในโลหะหลอมเหลว แสดงดังรูปที่ 2.6 เมื่อโลหะหลอมเหลวมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวตามสมดุล โลหะหลอมเหลวจะก่อกำเนิดนิวเคลียสและเติบโตกลายเป็นของแข็งทั้งหมดพร้อม ๆ กัน (แต่ในทางปฏิบัติแล้วพบว่าจะมีการแข็งตัวที่เร็วกว่าสมดุลมาก



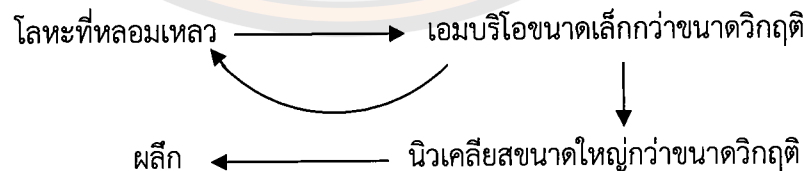
รูปที่ 2.6 ลักษณะต่าง ๆ ของการแข็งตัวของโลหะ

- ก) การเกิดนิวคลีไอ  
 ข) การโตของนิวคลีไอเป็นผลึก  
 ค) การเชื่อมต่อกันของผลึกเกิดเป็นเกรน  
 ที่มา : แม้น (2551)

โดยกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

### 2.3.1.1 การกำเนิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation)

เป็นกลไกที่ง่ายที่สุดที่มักจะถูกนำมาพิจารณาก่อน กล่าวคือมักจะเกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า Undercooling โดยไม่มีตัวช่วยในการเกิดนิวเคลียส ซึ่งต้องการปริมาณ Undercooling (อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจำนวนมาก) อาจจะต้องมากถึงหลายร้อยองศาเซลเซียสสำหรับโลหะบางชนิด นิวเคลียสที่เกิดขึ้นโดยกลไกนี้ จะเกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมของโลหะอย่างช้าๆ มาเกิดพันธะระหว่างกัน จนกระทั่งได้ขนาดที่อยู่ตัว เรียกว่า ขนาดวิกฤติ (Critical Size) ซึ่งสามารถที่จะเติบโตเป็นผลึกต่อไป นิวคลีไอที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤตินี้ เรียกว่า เอมบริโอ (Embryo) ซึ่งจะละลายกลับไปในโลหะหลอมเหลว แต่ถ้านิวคลีไอมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤติ เรียกว่า “นิวเคลียส (Nucleus)” ซึ่งจะอยู่ตัวและเกิดเป็นผลึกต่อไป



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดผลึก

ที่มา : แม้น (2551)

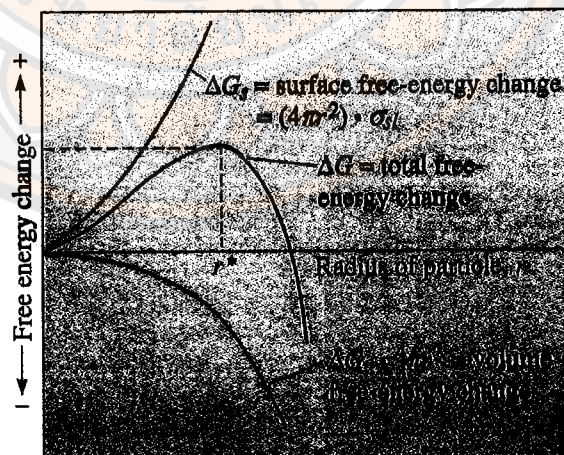
ตารางที่ 2.3 ค่าของอุณหภูมิของจุดเยือกแข็ง ความร้อนของการหลอมเหลว พลังงานเชิงพื้นผิว และค่า Undercooling สูงสุดสำหรับโลหะบางชนิด

โลหะ	จุดเยือกแข็ง		ความร้อนของการหลอมเหลว (J/cm <sup>3</sup> )	พลังงานเชิงพื้นผิว (J/cm <sup>2</sup> )	Undercooling สูงสุด (°C)
	°C	K			
Pb	327	600	280	$33.30 \times 10^{-7}$	80
Al	660	933	1066	$93 \times 10^{-7}$	130
Ag	962	1235	1097	$126 \times 10^{-7}$	227
Cu	1083	1356	826	$177 \times 10^{-7}$	236
Ni	1453	1726	2660	$255 \times 10^{-7}$	319
Fe	1535	1808	2098	$204 \times 10^{-7}$	295
Pt	1772	2045	2160	$240 \times 10^{-7}$	332

ที่มา : แม้น (2551)

พลังที่เกี่ยวข้องในกลไกของการเกิดนิวเคลียสไอแบบเอกพันธ์ ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงพลังงาน 2 ชนิดคือ

- พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (Volume หรือ Bulk Free Energy;  $\Delta G_v$ ) ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะให้ออกมาเมื่อมีการแข็งตัวของโลหะที่หลอมเหลว ซึ่งมีค่าเป็นลบ
- พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว (Surface Free Energy;  $\Delta G_s$ ) เป็นพลังงานที่ต้องการ เพื่อทำให้เกิดผิวของของแข็งใหม่ของอนุภาคของแข็งนิวเคลียสไอ ซึ่งมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.8 พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta G$ ) เทียบกับรัศมีของเอมบริโอ หรือนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจากการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ถ้ามีรัศมีของอนุภาคโตกว่า  $r^*$  (ขนาดวิกฤติ) แล้วนิวเคลียสจะโตต่อไป

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

โดยธรรมชาติแล้วระบบจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตนเอง จากสถานะที่มีพลังงานสูงไปยังสถานะที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งจากกราฟ (รูปที่ 2.8) จะเห็นได้ว่า ในการทำโลหะบริสุทธิ์แข็งตัวนั้น ถ้าอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤติ ( $r^*$ ) พลังงานของระบบจะลดต่ำลงเมื่ออนุภาคของแข็งเหล่านั้นมีขนาดเล็กลงด้วยการละลายกลับเข้าสู่โลหะที่หลอมเหลวใหม่อีกครั้ง ด้วยเหตุนี้เอนมบริโอจึงไม่อยู่ตัว และสามารถละลายกลับเข้าสู่โลหะหลอมเหลวได้อีกครั้ง แต่ถ้าขนาดของอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤติ พลังงานของระบบจะมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อขนาดอนุภาคของแข็งเหล่านี้มีขนาดใหญ่โตขึ้นจนกลายเป็นผลึก แต่อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่เอนมบริโอสามารถเจริญเติบโตต่อไปจนได้ขนาดวิกฤตินั้นเป็นเพราะได้รับพลังงานจากพลังงานอิสระเชิงปริมาตรที่ถูกปล่อยออกมาในขณะที่โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวเพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวใหม่ (กิตติพงษ์, 2553)

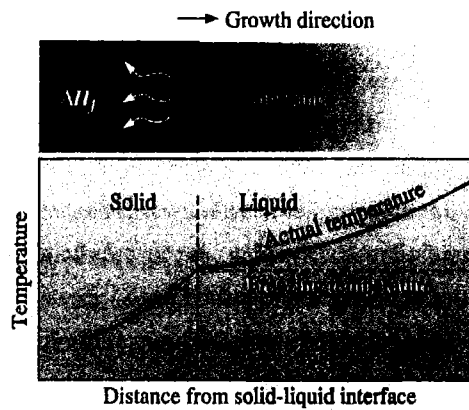
### 2.3.1.2 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation)

เป็นกลไกที่นิวเคลียสเกิดขึ้นภายในโลหะหลอมเหลว โดยอาศัยสิ่งเจือปน หรือวัสดุอื่นๆ เป็นตัวช่วยในการเกิดนิวเคลียส ดังนั้น จึงต้องการปริมาณ Undercooling ไม่สูงมากนัก และโดยทั่วไป มักจะพบว่ากระบวนการหล่อโลหะในอุตสาหกรรมจะทำให้ Undercooling ไม่สูงมาก คืออยู่ระหว่าง 0.1-10 องศาเซลเซียส จึงอาจกล่าวได้ว่าการเกิดนิวเคลียสในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ มักจะเป็นแบบวิวิธพันธ์มากกว่าแบบเอกพันธ์ ในการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ สารตัวก่อเกิดนิวเคลียส (Nucleating Agent) (ของแข็งเจือปน หรือวัสดุอื่นๆ) จะต้องถูกทำให้เปียกด้วยโลหะที่อยู่ในสถานะของเหลว นอกจากนี้ของเหลวก็ควรจะเป็นของแข็งได้ง่ายบนสารก่อเกิดนิวเคลียส

สารก่อเกิดนิวเคลียส ซึ่งถูกทำให้เปียกโดยของเหลวที่กำลังจะแข็งตัว ที่เกิดมุมสัมผัส  $\theta$  ต่ำระหว่างโลหะของแข็ง และสารก่อเกิดนิวเคลียส แสดงดังรูปที่ 2.9 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์เกิดขึ้นแบบสารก่อเกิดนิวเคลียส เพราะว่าเป็นพลังงานพื้นผิวที่จะเกิดนิวเคลียสที่เสถียรบนวัตถุตั้งกล่าวนี้นี้จะต่ำกว่าที่เกิดในตัวของของเหลวบริสุทธิ์เอง (การเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์) เนื่องจากพลังงานพื้นผิวจะต่ำกว่าในกรณีของการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระโดยรวมสำหรับการเกิดนิวเคลียสที่เสถียรจะต่ำกว่า และขนาดวิกฤติของนิวเคลียสก็จะเล็กกว่า (ณรงค์ศักดิ์, 2549)

ด้วยเหตุนี้ ปริมาณ Undercooling ที่ต้องการใช้ในการเกิดนิวเคลียสที่เสถียร ในกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์จะมีค่าน้อยกว่า



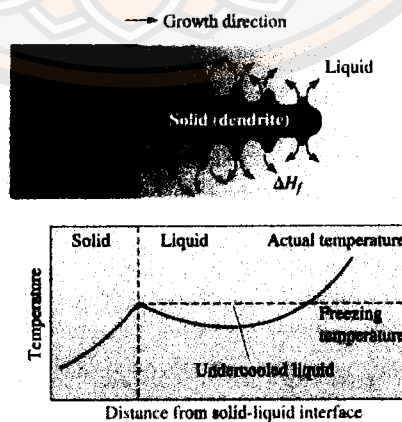


รูปที่ 2.10 เมื่ออุณหภูมิของของเหลวมีค่าสูงกว่าจุดแข็งตัว ส่วนที่ยื่นออกมาของอินเทอร์เฟซของเหลว และของแข็งจะไม่เกิดขึ้น ทำให้อินเทอร์เฟซนี้มีลักษณะเป็นระนาบซึ่งความร้อนแฝงจะสูญเสียผ่านออกไปทางของแข็ง

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

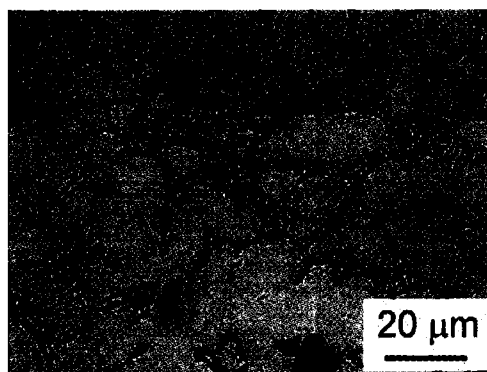
### 2.3.2.1 การเติบโตแบบกิ่งก้าน (Dendrite Growth)

เดนไดรต์ มาจากคำว่า Dendron ในภาษากรีกซึ่งหมายถึงต้นไม้ เมื่อของแข็งเดนไดรต์เติบโต ความร้อนแฝงในของแข็งเมื่อหลอมละลายจะถ่ายเทสู่ของเหลวที่ผ่าน Undercooling ทำให้อุณหภูมิของของเหลวนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นกิ่งก้านของเดนไดรต์จะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ และจะถ่ายเทความร้อนจากของแข็งที่เกิดขึ้นสู่ของเหลวที่ผ่าน Undercooling จนกระทั่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการแข็งตัวของเหลวที่หลงเหลือจะแข็งตัวแบบระนาบ ความแตกต่างระหว่างการแข็งตัวแบบระนาบ และเดนไดรต์ คือ รูปแบบการสูญเสียความร้อนแฝง ผนังแม่พิมพ์จะดูดซับความร้อนแฝงจากการแข็งตัวแบบระนาบ ขณะที่ของเหลวที่ผ่าน Undercooling จะดูดซับความร้อนแฝงของการแข็งตัวแบบเดนไดรต์



รูปที่ 2.11 การเกิดเดนไดรต์

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

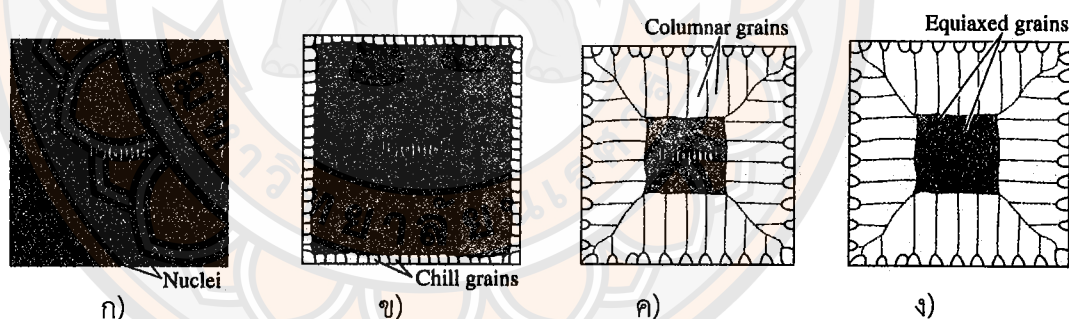


รูปที่ 2.12 เดนไดรต์ในอะลูมิเนียมผสม (ภาพขยาย 50 เท่า)

ที่มา : <http://materials-pisit.blogspot.com>

### 2.3.3 โครงสร้างชิ้นงานหล่อ (Casting Structure)

โลหะหลอมเหลวที่เทลงแบบหล่อแล้วแข็งตัวเป็นชิ้นงานหล่อ หรือบางครั้งเป็นชิ้นงานหล่ออย่างง่ายที่เรียกว่า แท่งอินกอต (Ingot) แท่งอินกอตนี้ใช้เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปถาวรให้เป็นชิ้นงานสำเร็จรูปต่าง ๆ ต่อไป โดยที่โครงสร้างมหภาคหรือโครงสร้างอินกอต (Ingot Structure) ของชิ้นงานหล่อประกอบด้วยพื้นที่ 3 ส่วน แสดงดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการเกิดผลึก

- ก) เริ่มเกิดนิวเคลียส
- ข) พื้นที่เย็นตัวเร็ว
- ค) การโตของเกรนทำให้เกิดเกรนคอลัมน์นาร์
- ง) การเกิดนิวเคลียสในแกนกลางทำให้เกิดเกรนอควิ-  
แอกส์

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

### 2.3.3.1 เขตเกรนเย็นเร็ว (Chill Zone)

เป็นเขตเล็ก ๆ แคบ เนื่องจากเป็นบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ง่ายที่สุด ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ กลมมน เนื่องจากโลหะเกิดการแข็งตัว หรือแข็งตัวได้อย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 2.12 ก) และ ข)

### 2.3.3.2 เขตเกรนคอลัมน์นาร์ (Columnar Zone)

เป็นเขตที่อยู่ถัดจาก chill zone ประกอบด้วยเกรนที่มีขนาดยาว เนื่องจากเป็นเขตมีการถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีเท่ากับ chill zone เกรนนี้จึงมีทิศทางการยาวตามทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากใจกลางชิ้นงานหล่อที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่เขตที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือตั้งฉากกับผนังแบบหล่อ

### 2.3.3.3 เขตเกรนอิกวิแอกซ์ (Equiaxed Zone)

เกรนอิกวิแอกซ์ที่มีขนาดใหญ่ หยาบ และกลมมน มักจะเกิดขึ้นบริเวณใจกลางของชิ้นงานหล่อแท่งอินกอตเสมอ เกรนชนิดนี้เกิดขึ้นจากการถ่ายเทอุณหภูมิที่ช้าเกินไป มีรูปร่างกลมมน วัดขนาดเกรนตามแกนกว้าง และยาวจะได้ขนาดที่ใกล้เคียงกัน เกรนอิกวิแอกซ์มีรูปลักษณะเกรนที่มีสมบัติสมมาตรกันทุกทิศทาง

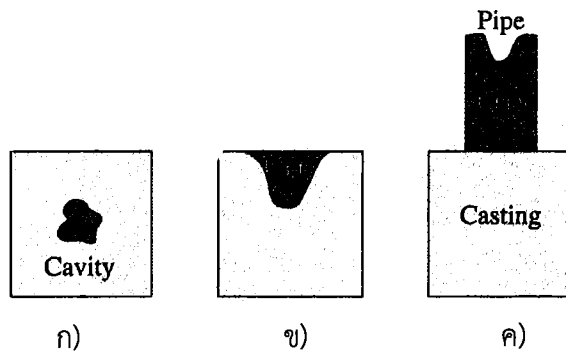
### 2.3.4 จุดบกพร่องในการแข็งตัว (Solidification Defects)

จุดบกพร่องในการแข็งตัวของโลหะสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบ แต่จุดบกพร่องที่เรียกว่า การหดตัว (Shrinkage) และรูพรุน (Porosity) ถือเป็นจุดบกพร่องสำคัญ เนื่องจากหากชิ้นงานมีรูพรุนอยู่ภายใน ชิ้นงานอาจจะพังทลายได้เมื่อนำไปรับแรง

#### 2.3.4.1 การหดตัว (Shrinkage)

วัสดุในสถานะของแข็งมีความหนาแน่นสูงกว่าในสถานะของเหลวด้วยเหตุนี้ ในขณะที่เกิดการแข็งตัว วัสดุมักจะเกิดการหดตัว

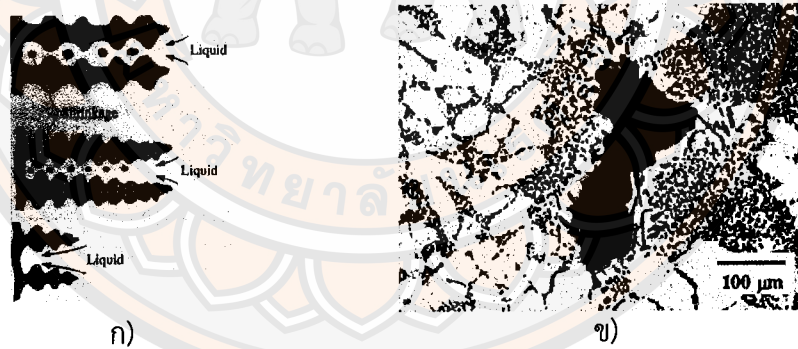
โดยปกติการหดตัวมักทำให้เกิดช่องว่างถ้าชิ้นงานหล่อเกิดการแข็งตัวพร้อมที่พื้นผิวรอบ ๆ ชิ้นงาน และถ้ามีพื้นผิวด้านหนึ่งเย็นตัวช้ากว่าด้านอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.14 ช่องว่างนี้มีผลเสียต่องานหล่อ เช่น หากเกิดช่องว่างในชิ้นงานหล่อสังกะสี ความชื้นในอากาศอาจถูกดักไว้ในช่องว่าง และหากนำชิ้นงานหล่อนั้นไปให้ความร้อนในเตาอบอาจเกิดการระเบิดได้เมื่อสังกะสีหลอมเหลว การควบคุมการเกิดช่องว่างในการหดตัวสามารถทำได้โดยการใส่รูลัน (Riser) เข้าไปในชิ้นงานหล่อ เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดการหดตัวของโลหะหลอมเหลวในรูลันจะเติมเต็มลงในช่องว่างส่วนที่หดตัว โดยเราจะต้องแน่ใจว่าโลหะหลอมเหลวในรูลันนั้นจะต้องหดตัวหลังจากชิ้นงานหล่อในแม่พิมพ์เกิดการแข็งตัวก่อนเท่านั้น



รูปที่ 2.14 การหดตัวแบบช่องว่าง (Cavity) และไฟป์ (Pipe) การหดตัวสามารถลดลงได้โดยการทำรู ล้นเพื่อเติมโลหะหลอมเหลวใส่ในชิ้นงาน

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

การหดตัวระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic Shrinkage) คือ รูพรุนเล็ก ๆ ระหว่างเดนไดรต์ แสดงดังรูป 2.15 เรียกว่า การหดตัวระดับจุลภาค (Micro Shrinkage) หรือรูพรุน หดตัว การหดตัวแบบนี้ป้องกันด้วยรูล้นได้ยาก แต่อาจแก้ปัญหาได้โดยทำให้เย็นตัวเร็วขึ้นซึ่งจะทำให้ เดนไดรต์มีขนาดสั้นลง และทำให้โลหะหลอมเหลวสามารถไหลเข้าไปเติมในเดนไดรต์ได้ หรือหากมีรู พรุนหลงเหลืออยู่ก็จะมีขนาดเล็ก และกระจายตัวในโครงสร้างที่สม่ำเสมอกว่า (John T.H. Pearce, 2554)



รูปที่ 2.15 การหดตัวระหว่างเดนไดรต์

ก) การหดตัวระหว่างแขนเดนไดรต์

ข) การหดตัวระหว่างแขนเดนไดรต์ในอะลูมิเนียมผสม

ที่มา : กิตติพงษ์ (2553)

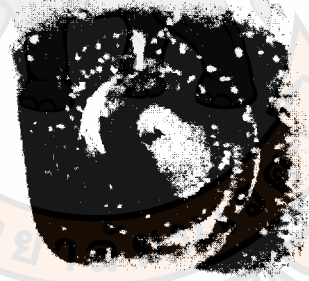
### 2.3.4.2 การเกิดรูพรุนเนื่องจากแก๊ส (Gas Porosity)

อะลูมิเนียมสามารถจับแก๊สไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็ว แก๊สไฮโดรเจนเหล่านี้ อาจเกิดจากการแยกตัวของความชื้นในบรรยากาศ เชื้อเพลิง ความชื้นจากเศษวัสดุทนความร้อนใน

เตา และเข้าหลอม ความชื้นในฟลักซ์ ฯลฯ และจากสารปนเปื้อนในวัตถุดิบ หรืออุปกรณ์ในการในการหล่อ ความสามารถในการละลายตัวของไฮโดรเจนในโลหะหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้นมากตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามการละลายตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่โลหะเกิดการแข็งตัว ซึ่งทำให้งานหล่อเกิดโพรงแก๊สได้ ถ้าไม่มีการลดปริมาณการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนก่อนการเท

การปฏิบัติงานหล่อที่ดีควรลดแก๊สไฮโดรเจนลงให้มากที่สุดโดยการหลีกเลี่ยงอุณหภูมินำโลหะที่สูงเกินไป ใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่ผ่านการอุ่นแล้วทำให้แห้ง และเศษวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ควรหลีกเลี่ยงการเจือปนของน้ำมันในโลหะที่ใส่ลงในเตา การทำดังนี้จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนถูกกำจัดไป แม้ว่าโพรงแก๊สจะลดความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) แต่เนื่องจากโพรงแก๊สไม่มีเหลี่ยมไม่มีมุมทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นยังคงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพรงการหดตัว

ในการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold Casting) จะมีแก๊สที่มีขนาดเล็ก และกระจายตัวได้ดีในภาคตัดที่หนา ในบางกรณีจะมีการใส่แก๊สเข้าไปในขณะที่หลอม เพื่อที่จะทำให้แก๊สฟอรั่มตัวบริเวณมุมแทนที่การหดตัวบริเวณมุมในขณะที่เกิดการแข็งตัวเนื่องจากการเกิดโพรงจากการหดตัวจะเป็นอันตรายต่อสมบัติทางกลของงานหลอมมากกว่า (John T.H. Pearce, 2554)



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดรูพรุน

ที่มา : John T.H. Pearce (2554)

#### 2.4 กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting)

โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะผสมที่มีสมบัติทางด้านกรหล่อหลอมที่ดี เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ และมีความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้สามารถหล่อรูปร่างต่าง ๆ ได้สะดวกแม้มีรูปร่างที่ซับซ้อน หรือชิ้นงานหล่อที่มีความบางมากก็ตาม

สำหรับโครงการวิจัยนี้กล่าวถึงกระบวนการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อยแม่เหล็ก/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ในแบบหล่อถาวรโดยมีเทคนิคในการเทโลหะหลอมเหลวโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง แบบหล่อจะทำจากเหล็กกล้าที่มีความคงทน แข็งแรงซึ่งสามารถนำมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง แบบหล่อสำหรับโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วยรูเท ทางวิ่ง ทางเข้า รูล้น ช่องว่างสำหรับน้ำโลหะ และแบบหล่อที่มีสอง

ส่วนที่นำมาประกบกันยึดติดด้วยอุปกรณ์ช่วยยึดแน่น เมื่อนำแบบหล่อมาประกบกันแล้วก็สามารถเท โลหะหลอมเหลวใส่ลงไปได้ มีข้อเสียคือ ในเรื่องของความถี่ของรอบการปฏิบัติงานที่นาน และส่งผล ต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ ส่วนข้อดีมีในเรื่องของความแตกต่างของอุณหภูมิแบบหล่อกับน้ำ โลหะที่มีความแตกต่างทางความร้อนต่ำ (อภิณัฐ, 2555)

#### 2.4.1 อุณหภูมิการหลอม และอุณหภูมิการเทน้ำโลหะ

อุณหภูมิในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อแม่ก็ควรจะศึกษาจากแผนภูมิสมดุล ของอะลูมิเนียมกับซิลิคอน เพื่อให้ทราบถึงจุดหลอมเหลวที่แน่นอน เมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเกิดการ หลอมละลาย และเมื่อทำการกวนผสมเสร็จแล้ว จึงต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของการเทที่เหมาะสมเพื่อให้ มีผลต่อการไหลของน้ำโลหะหลอมเหลว และสมบัติบางประการ จากผลงานการวิจัยของ Mohammad B. Ndaliman กล่าวคือ ขณะที่อุณหภูมิเทอยู่ในช่วง 680 องศาเซลเซียส ถึง 750 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างชิ้นงานมาทดสอบคุณภาพ และคุณสมบัติ เช่น ความแข็ง ผลของการ ทดลองได้ว่า อุณหภูมิของการเทใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสม พบว่าจะได้การหล่อที่ มีคุณภาพดี

ดังนั้นสำหรับโครงการวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิเทประมาณ 690 องศาเซลเซียส เพื่อ รักษาการสูญเสียความร้อนระหว่างการเทโลหะหลอมเหลว

### 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ

เทคนิคการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์ เป็นการศึกษารูปร่าง และ โครงสร้างของวัสดุ ข้อมูลเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพที่เกี่ยวข้องกับขนาดของเกรน ขอบเกรน ภูมิภาคที่มี อยู่ การทำลายที่เกิดขึ้นภายใน และความไม่สมบูรณ์บางประเภทสามารถได้ปรับโดยใช้เทคนิคนี้ ซึ่ง การตรวจสอบแต่ละแบบจะมีวิธีการ และจุดประสงค์ที่แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดดังนี้

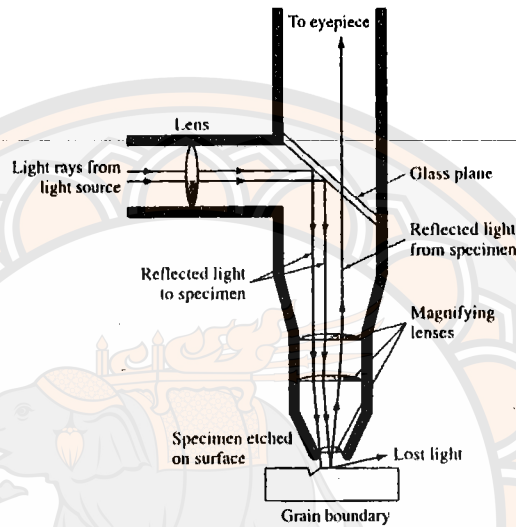
#### 2.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscopic Examination)

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยตาเปล่าหรือถ้าใช้ กล้องขยายก็ใช้กำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นมี ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก เพราะเป็นการตรวจสอบรูพรุนภายในของโลหะ การแยกชิ้นของผลึก รอยแตก ร้าว หน้าตัดที่ถูกแรงดึงจนขาด และปริมาณธาตุผสมในโลหะเป็นต้น

#### 2.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscopic Examination)

โครงสร้างจุลภาค คือ โครงสร้างของโลหะที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายไม่เกิน 2000 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึงรูปร่าง ขนาดการจัดเรียงตัวของ ผลึก และลักษณะเกรน

เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่บดการศึกษารูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะของเกรนนั้น ต้องนำไปขัด กัดกรด อะตอมที่ขอบเกรนจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีรวดเร็วกว่าอะตอมที่อยู่ภายในเกรน เพราะว่าอะตอมที่ขอบเกรนจะมีพลังงานสูงกว่าเนื่องจากมีความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวที่น้อยกว่า จากการกัดเซาะบริเวณขอบเกรนนี้ทำให้เกิดร่องรอยลึก เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การสะท้อนหันเหอกนอกทิศทางเดิมแล้วเราจะสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การสะท้อนของแสงจากพื้นผิวโลหะที่ถูกขัด  
ที่มา : แม้น (2551)

### 2.5.2.1 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบ

#### ก. การขัดหยาบ

ขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 180, 320, 600, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ขณะขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ น้ำชำระสิ่งสกปรก ซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด รวมทั้งน้ำจะช่วยลดอุณหภูมิในการขัด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ต่อไปต้องขัดขึ้นตรวจสอบให้ตั้งฉากกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายเบอร์สุดท้าย

#### ข. การขัดละเอียด

การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วย ผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.3-1.0 ไมโครเมตร จะต้องขัดบนจานหมุนที่ติดผ้าสักหลาดไว้ โดยนำผงขัดผสมกับน้ำเหลวบนผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวจนมันวาว

ค. การกัดกรวด (Etching)

ชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก เจือจางน้ำร้อยละ 2 โดยปริมาตร

2.5.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

กล้องจุลทรรศน์แสงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ โดยมีแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ลำแสงตกกระทบกับผิวหน้าโลหะแล้วสะท้อนกลับ เพื่อให้สามารถเห็นภาพได้อย่างชัดเจน การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องชนิดนี้จะใช้กำลังขยายไม่เกิน 2000 เท่า ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบมีดังนี้

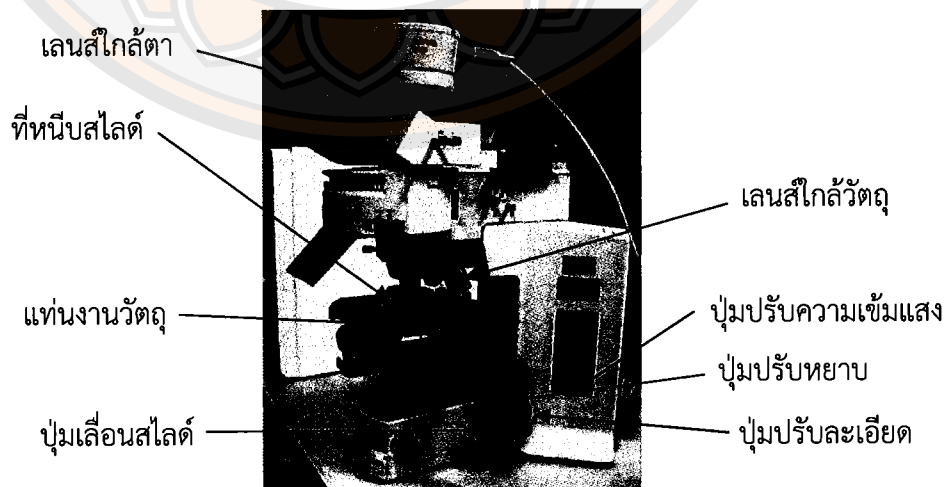
ก. วางชิ้นงานตรวจสอบบนแท่นวางวัตถุ โดยเริ่มแรกต้องปรับเป็นกำลังขยายที่ต่ำที่สุด

ข. เปิดสวิตช์ และปรับความเข้มของแสงได้ตามต้องการ

ค. จากนั้นปรับระยะโฟกัส โดยทำการปรับหยابเพื่อให้เห็นภาพก่อน ดังนั้นจึงทำการปรับละเอียดเพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน และคมชัดขึ้น เมื่อภาพที่ได้ยังไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ ทำการเปลี่ยนกำลังขยายโดยการหมุนเลนส์ใกล้วัตถุ แล้วจึงทำการปรับระยะโฟกัสอีกครั้ง

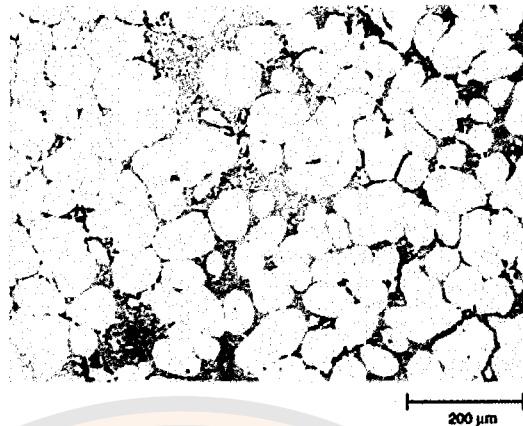
ง. เมื่อได้ภาพที่ชัดเจนแล้ว จึงทำการถ่ายภาพเก็บข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

จ. เมื่อหยุดการทำงาน ต้องทำการเลื่อนแท่นวางวัตถุให้อยู่ต่ำที่สุดแล้วจึงนำชิ้นงานตรวจสอบออก ในขั้นตอนนี้ควรระมัดระวังไม่ให้ชิ้นงานตรวจสอบกระทบกับเลนส์ใกล้วัตถุ เพราะอาจจะทำให้เลนส์เกิดการชำรุด หรือมีรอยขีดข่วน ส่งผลให้การตรวจสอบโครงสร้างครั้งต่อ ๆ เกิดการผิดพลาด



รูปที่ 2.18 กล้องจุลทรรศน์แสง

ที่มา : <http://www.microscopic.center.sci.buu.ac.th/service-LM.html>



รูปที่ 2.19 ลักษณะภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แสง  
ที่มา : ASM Handbook, Vol. 09

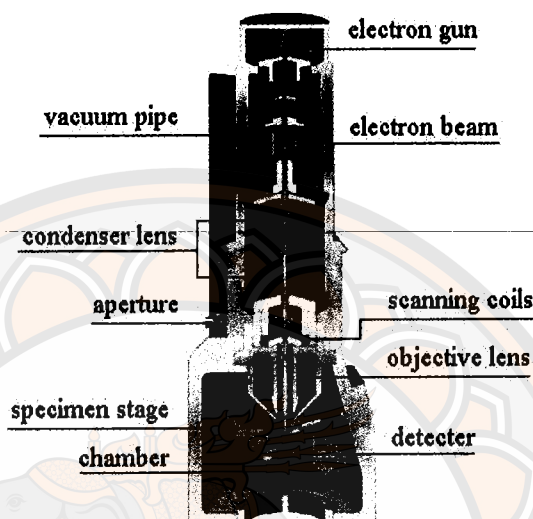
### 2.5.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 2.20 ลักษณะภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
ที่มา : <http://www.mfu.ac.th>

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และ

สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมีวิทยา จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : <http://www.mfu.ac.th>

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่ หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงให้เป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป

## 2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่เราสามารถนำมาประกอบการใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสม เช่น ใช้ในการพัฒนาใช้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแม่พิมพ์โลหะ หรือในกรณีเลือกใช้ใบมีด (Cutting Tool) สำหรับการตัดโลหะ และวัสดุชนิดต่าง ๆ

18 ก.ค. 2556

J 6318679



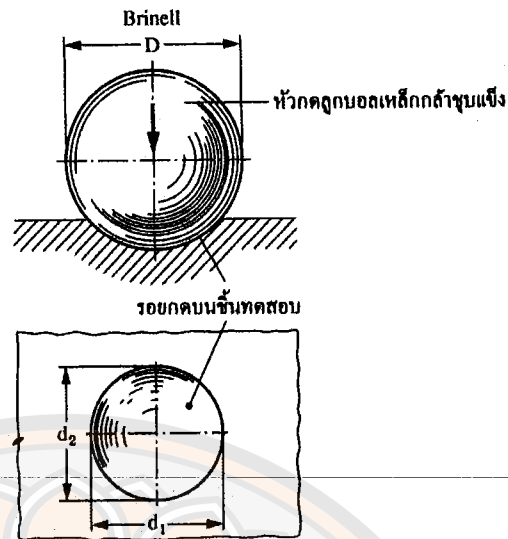
หรืออาจจะเป็นการทำงานที่ได้รับการเสียดสีมาก ๆ เช่น เพือง วัสดุเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีสมบัติ  
แข็งแรงสูงเป็นพิเศษ

สำนักทดสอบ

ความหมายของคำว่าความแข็งนั้นสามารถอธิบายได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้วิธีการ  
ใดในการตรวจสอบความแข็ง การทดสอบความแข็งของวัสดุโดยทั่วไปนั้นสามารถเลือกใช้ได้หลายวิธี  
ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ นั้น ๆ เช่น การวัดค่าความแข็งของแร่ชนิดต่างๆนิยมใช้วิธีที่เรียกว่า  
Scratch Hardness Test โดยแบ่งเป็น Moh'Scale เริ่มต้นตั้งแต่ 1-10 วิธีการทดสอบนี้สามารถวัด  
ค่าความแข็งได้อย่างกว้างๆ ตั้งแต่ Talcum ซึ่งมีค่า Moh'Scale เท่ากับ 1 ไปจนถึงเพชรที่มีระดับ  
ความแข็งสูงสุดวัดค่าได้ 10 หลักการที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าเมื่อขีดวัสดุที่แข็งลงบนวัสดุที่อ่อนกว่า  
ก็จะทำให้เกิดรอยลึกบนวัสดุที่อ่อนกว่านั้น เป็นต้น ส่วนในกรณีของวัสดุประเภทโลหะนั้นจะมี  
ค่าความแข็งประมาณ 4-8 ซึ่งค่าดังกล่าวไม่ละเอียดพอที่จะสามารถแสดงความแตกต่างในการใช้งาน  
ในเชิงวิศวกรรมได้ ดังนั้นการวัดความแข็งของวัสดุกลุ่มโลหะ นิยมวัดโดยวิธีการใช้หัวกด (Indenter)  
กดลงบนผิวของโลหะซึ่งมีผลทำให้เกิดรอยลึกลงบนบริเวณที่กดนั้นเนื่องจากการเสียรูปแบบถาวร  
(Plastic Deformation) เกิดขึ้น ถ้าเรากำหนดแรงที่ใช้กดลงบนผิวโลหะมีค่าเท่ากันแล้ววัสดุที่เกิด  
รอยกดยิ่งลึก หรือกว้างมากเท่าไรก็ยิ่งมีความต้านทานต่อการกดน้อยเท่านั้น หมายความว่าวัสดุชนิด  
นี้มีค่าความแข็งน้อยกว่าวัสดุที่เกิดรอยกดตื้น การวัดค่าความแข็งแบบหัวกด (Indenter) นี้ยังสามารถ  
แบ่งออกได้เป็น Brinell, Rockwell, Vickers, และ Knoop ตามลักษณะของหัวกดที่ใช้ซึ่งมีหลัก และ  
วิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

### 2.6.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเป็นลักษณะหัว Ball ทำจากเหล็กกล้า และมีขนาด  
เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร นี้ได้ถูกเสนอโดย J.A.Brinell ในปี 1900 โดยมีหลักในการทดสอบ คือ  
การใช้หัวกด (Ball) กดลงบนชิ้นงานจนเกิดรอยกด (Impression) เป็นลักษณะคล้ายทรงกลม แสดง  
ดังรูปที่ 2.22 เนื่องจากวิธีการทดสอบนี้จะแปรผลค่าความแข็งจากขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรอย  
กด ดังนั้นรอยกดที่เกิดขึ้นไม่ควรมึลักษณะที่บิดเบี้ยว หรือลึกเกินไปจนอาจมีผลทำให้วัดค่าความแข็ง  
ผิดพลาดได้



รูปที่ 2.22 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล  
ที่มา : মানพ (2546)

การวัดความแข็งแบบบริเนลจะใช้เวลาในการกดชิ้นงานประมาณ 30 วินาที เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน และเพื่อป้องกันรอยกดที่ลึกจนเกินไปจากค่ามาตรฐานของน้ำหนักที่ใช้กดลงบนผิวโลหะนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่นำมาทดสอบ โดยมีหลักการคำนวณดังนี้

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

โดย P คือ น้ำหนักกด, kg

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัว Ball, mm

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกด, mm

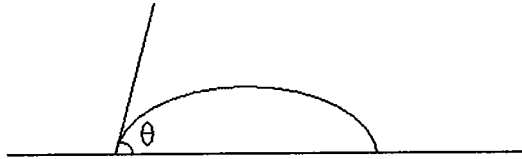
หมายเหตุ ค่า HB ที่วัดได้นี้มีหน่วยเป็น  $\text{kgf.mm}^{-2}$  (กิโลกรัมแรงต่อตารางมิลลิเมตร)

$$(1 \text{ kgf.mm}^{-2} = 9.81 \text{ MPa})$$

## 2.7 การเปียกผิว (Wettability)

การเปียกผิว คือ ความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลจาก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล โดยระดับขั้นของสภาวะการเปียกผิวขึ้นกับความสมดุลระหว่าง แอตฮีชั่น และโคฮีชั่น ซึ่งสภาวะการเปียกผิวมีความสำคัญในการยึดติดกันของวัสดุทั้งสอง

แรงแอดฮีชันระหว่างของเหลว และของแข็ง ทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่วพื้นผิว ส่วนแรงโคฮีชันภายในของเหลวเอง ทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลม และไม่สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง



รูปที่ 2.23 มุมสัมผัสของการเปียกผิว

ที่มา : Eustathopoulos (1999)

มุมสัมผัสนี้บอกถึงแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว

มุมสัมผัสที่น้อยกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

ตารางที่ 2.4 แสดงมุมสัมผัสค่าต่างๆ และปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง

Contact angle	Degree of wetting	Strength of:	
		Sol./Liq. interactions	Liq./Liq. interactions
$\theta = 0$	Perfect wetting	strong	weak
$0 < \theta < 90^\circ$	high wettability	strong	strong
		weak	weak
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	low wettability	weak	strong
$\theta = 180^\circ$	perfectly non-wetting	weak	strong

ที่มา : Eustathopoulos (1999)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ali Mazahery, Mohsen Ostad Shabani (2012) โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของนาโนวัสดุเชิงประกอบได้ถูกศึกษาโดยวิธีการกวนหล่อ โดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 เสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนของซิลิคอนคาร์ไบด์ การวัดความหนาแน่นได้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก และปริมาณของรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาตรของซิลิคอนคาร์ไบด์ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และกล้องจุลทรรศน์ส่องผ่าน ซึ่งผลที่ได้พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีการกระจายตัวอย่าง

สม่ำเสมอ อนุภาคนาโนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความเหนียว ความเค้นจุดคราก และความเค้นแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง เมื่อส่วนผสมของอนุภาคนาโนของซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก

Yao Shasha (2012) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการกวนต่อการกระจายตัวของอนุภาค SiC และ ใน A 356 โดยออกแบบการทดลองดังนี้ ได้เตรียมของเหลว A 356 หลังจากนั้นผสม SiC และของเหลว A 356 โดย SiC จะเริ่มเทลงในเบ้าหลอมที่เตรียมให้ร้อน (ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) โดย SiC ได้กระจายตัว และเกลี่ยผิวให้เรียบที่ก้นของเบ้าหลอม หลังจากนั้นใช้แผ่น A 356 ที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร วางทับลงไป (เพื่อป้องกันการกระแทกจากเทของเหลว A 356) จากนั้นเทของเหลว A 356 ลงในเบ้าหลอม และเติมก๊าซอาร์กอนลงไป เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของของเหลว A356-SiC หลังจากนั้นเบ้าหลอมถูกปรับให้มีอุณหภูมิเป็น 650 องศาเซลเซียส โดยให้อุณหภูมิคงที่ เครื่องกวนจะถูกเปิดและใช้ความเร็วรอบในช่วง 100-450 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการกวน 8 นาที หลังจากนั้นเทลงในแม่พิมพ์ จากผลการทดลองพบว่า การกระจายตัวของ SiC ที่ส่วนกลางของชิ้นงานมีการกระจายตัวดีที่สุดที่ความเร็วรอบ 150-200 รอบต่อนาที และการกระจายตัวของ SiC ที่ส่วนบนของชิ้นงานมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นเมื่อใช้ความเร็วรอบ 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 และ 450 ตามลำดับ

Neelima Devi C. (2011) วัสดุทางวิศวกรรมแบบดั้งเดิมที่ใช้ทั่วไป เช่น เหล็ก ทองเหลือง อะลูมิเนียม และอื่นๆ ปัจจุบันมีการใช้น้อยลง และมีการใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมแทนวัสดุดังกล่าว อีกทั้งยังเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดที่เข้ากับความต้องการของการออกแบบวัสดุให้มีสมบัติตามที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแรงดึง โดยใช้การสุ่มมวลของส่วนผสมของซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าสูงสุดคือ โลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่มีส่วนผสมของซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และสมบัติทางกล สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ถูกศึกษาในเวลาต่อมา

Wisam M. Abu Jadayil (2011) งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับข้อบกพร่องของการหล่อ โดยมีการสุ่มตัวอย่างของอัตราการเทโดยใช้แม่พิมพ์ทรายโดยใช้เทคนิค Two Nondestructive Testing โดยทำการศึกษาจากชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น ซึ่งมีอัตราการเทที่แตกต่างกัน และตรวจสอบโดย Penetrant Test (PT) และ Ultrasonic Test (UT) ซึ่งอธิบายข้อบกพร่องที่พื้นผิว และใต้พื้นผิวตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าอัตราการเทที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดข้อบกพร่องบนพื้นผิวมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าข้อบกพร่องใต้พื้นผิวลดลง

Amirkhanlou S. (2010) การกวนหล่อเป็นหนึ่งในวิธีที่ง่ายของการผลิตอะลูมิเนียมคอมโพสิตเมทริกซ์ แต่ข้อเสียที่พบ คือ การเข้ากันที่ต่ำระหว่างเนื้อพื้นกับอนุภาคเสริมแรง และการกระจายของอนุภาคเสริมแรงในเนื้อพื้น การพัฒนาวิธีการใหม่สำหรับการเติมของอนุภาคที่ดีขึ้นในการหลอมโลหะ ซึ่งจะส่งผลในการกระจายตัวของอนุภาคให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และมีประสิทธิภาพการรวมตัวของอนุภาคเสริมแรงเข้าไปในเนื้อพื้นมากขึ้น ในงานนี้ใช้อะลูมิเนียม A 356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยปริมาตร ที่มีขนาดของซิลิคอนคาร์ไบด์เฉลี่ยประมาณ 8 และ 3 ไมโครเมตร ถูกผลิตโดยการฉีด

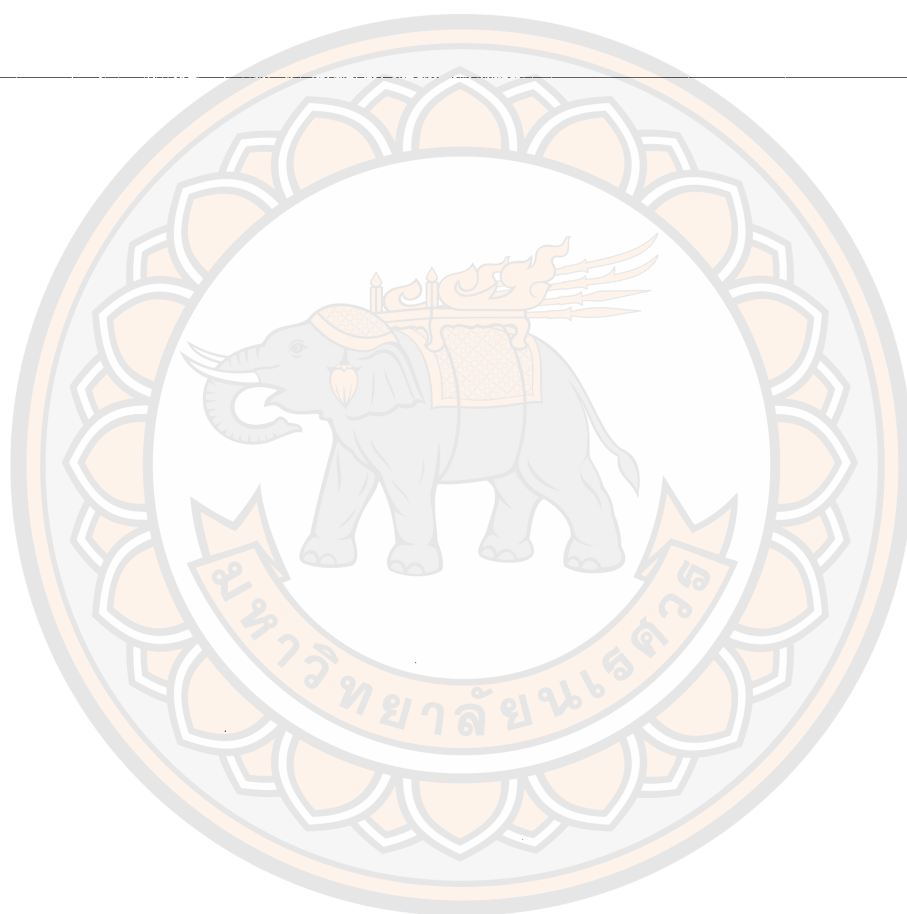
อนุภาคเสริมแรงเข้าไปในของเหลวอะลูมิเนียม 356 ผลการศึกษาพบว่า การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในรูปแบบของ Al-SiCp เชิงประกอบ และหล่อในสภาวะกึ่งแข็ง ขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ลดลง การเป็ยกผิวระหว่างเนื้อพื้นที่หลอมละลายกับอนุภาคเสริมแรงมีค่าเพิ่มขึ้น การกระจายของอนุภาคเสริมแรงในเนื้อพื้นที่ขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มความแข็ง และรพุนลดลง

Manoj Singla, และคณะ (2009) เนื่องจาก Metal Matrix Composite (MMCs) ได้รับความสนใจมากขึ้นในการใช้งานในอุตสาหกรรมการบิน และอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ต้องการอัตราส่วนของความแข็งต่อน้ำหนักที่สูง และใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ MMCs ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง แต่ยังมีต้นทุนการผลิตที่สูง ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการศึกษาการกระจายของส่วนเสริมแรงภายในเนื้อพื้นที่ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติ และคุณภาพของวัสดุผสม การศึกษาครั้งนี้ได้พยายามพัฒนาโลหะผสมอะลูมิเนียม/ซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการผลิตให้มีราคาต่ำลง และการพัฒนาการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และจะใช้เทคนิคการกวนหล่อ (stir casting) ของวิธี two step-mixing เข้ามาช่วยวิเคราะห์สมบัติของอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์ อะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ถูกเลือกนำมาเป็นเนื้อพื้นที่ และส่วนเสริมแรง ตามลำดับ น้ำหนักของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผสมในอะลูมิเนียมร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดมีค่าคงที่ ผลของการทดลองพบว่าผลที่ดีที่สุดคือส่วนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความแข็งสูงสุด คือ 45.5 HB และค่าทนต่อแรงกระแทกสูงสุดคือ 36 นิวตันเมตร

Mohammad B. Ndaliman and Akpan P. Pius (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิการเท และอัตราความเร็วต่อสมบัติทางกลของการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม ได้ทำการหล่อที่อุณหภูมิการเท และอัตราความเร็วที่แตกต่างกัน ช่วงความเร็วที่ใช้ คือ 0.2 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 16 เซนติเมตรต่อวินาที ขณะที่อุณหภูมิเทอยู่ในช่วง 680 องศาเซลเซียส ถึง 750 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างชิ้นงานมาทดสอบคุณภาพ และสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็ง ผลของการทดลองพบว่า อุณหภูมิของการเทที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของโลหะผสมอะลูมิเนียม พบว่าจะได้การหล่อที่มีคุณภาพดี ร่วมกับค่าที่เหมาะสม มีความแข็งและความแข็งเป็น 65.5 และ 112 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราของการเทที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 เซนติเมตรต่อวินาที จะได้ค่าความแข็งเป็น 65.4 และ 127 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

Jasmi Hashim (2001) ในการศึกษาที่ต้องการศึกษาการผลิตการหล่อ MMC โดยการทดลองนี้ใช้ A359เป็นเนื้อพื้นที่ และใช้ SiC ขนาด 29.2 ไมโครเมตร เป็นส่วนเสริมแรง เมื่อใส่สารลงในบ้ำหลอมที่ทำจากแกรไฟต์ และให้ความร้อนในสภาวะเฉื่อยจนกระทั่งส่วนที่เป็นเนื้อพื้นที่หลอมเหลวจากนั้นทำการกวนโดยใช้ Two-Step Stirring ก่อนทำการเทลงสู่แม่พิมพ์ ที่มีข้อดีในรูปของการเป็ยกผิวระหว่าง SiC กับ A 359 ผลของความสำเร็จในการรวมกันของ SiC ลงในเนื้อพื้นที่ จากการทดลองพบว่า การเป็ยกผิวระหว่าง SiC และสมบัติทางกล เช่น ความแข็ง และความแข็งแรงดึง ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้

J. Hashim และคณะ (2001) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปียกผิว ได้แก่ การเติมสารเคมีลงไป เช่น แมกนีเซียม การทำ Particle treatment การทำ Particle coating รวมไปถึงให้แรงทางกลระหว่างที่อะลูมิเนียมผสมอยู่ในสถานะ semi-solid state ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ทำให้ระหว่างอะลูมิเนียมกับอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์มีการเปียกผิวที่ดีขึ้น

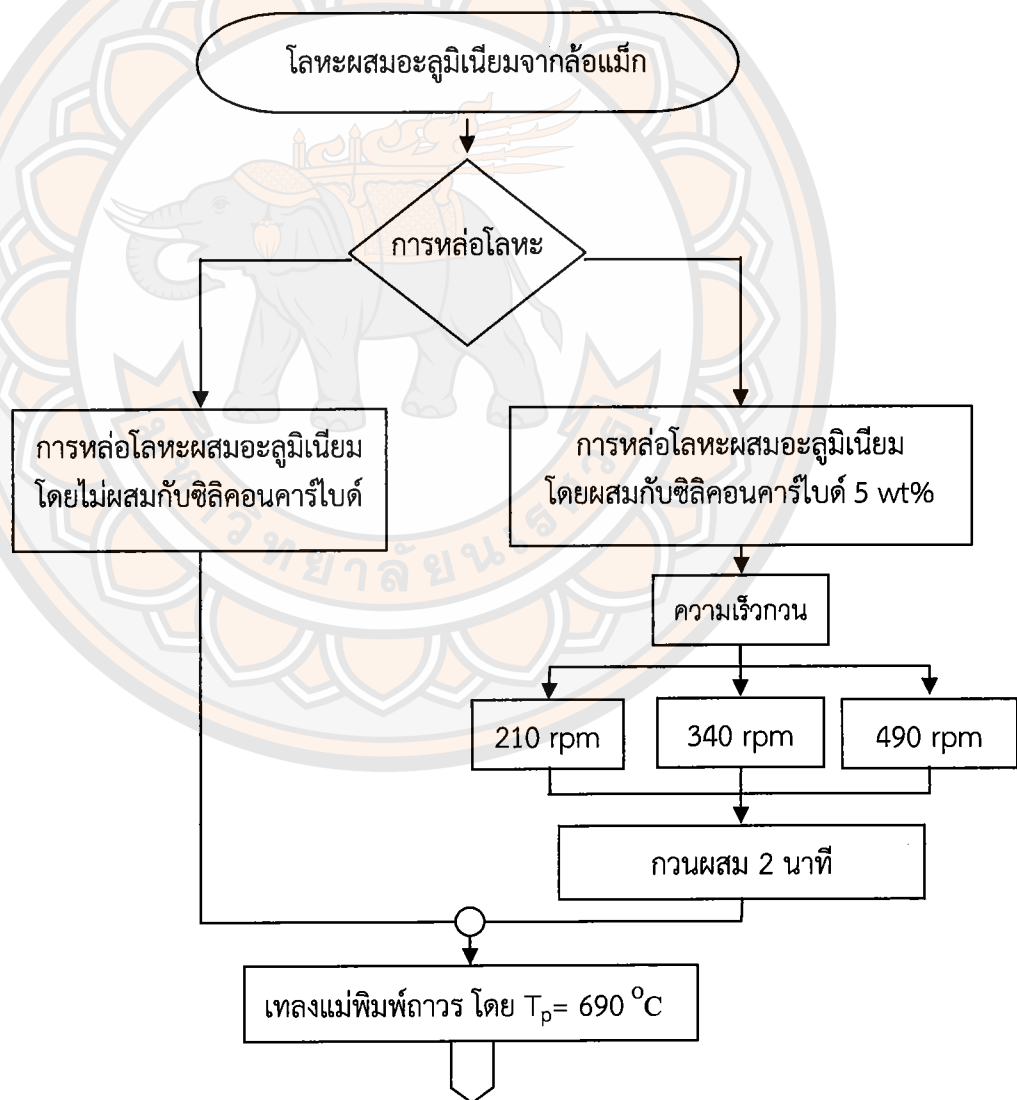


### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

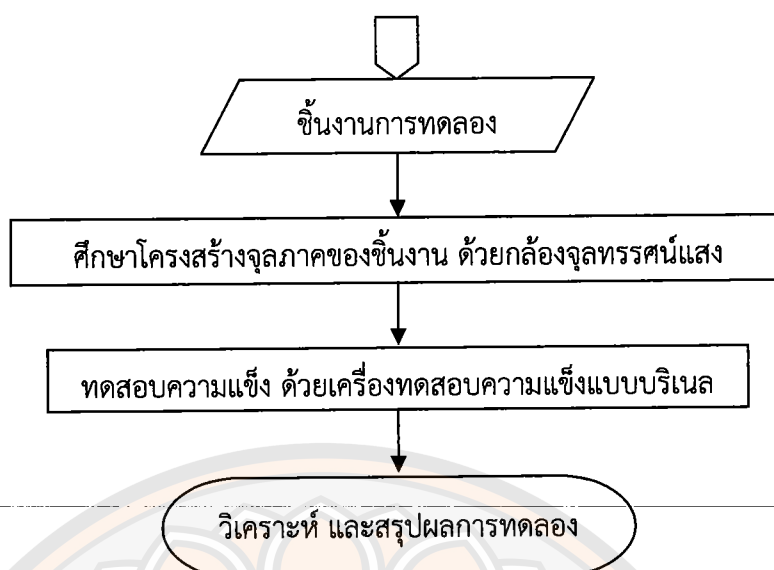
สำหรับวิธีการดำเนินงานวิจัยนี้ จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำ  
โครงการ งาน วัสดุ อุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ

ในการศึกษาผลของซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ โลหะผสม  
อะลูมิเนียมจากล่อแม่เหล็ก/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลิตโดยกระบวนการกวนหล่อ มีขั้นตอนในการดำเนินงาน  
แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

#### 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1.1 โลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อแม่็ก

โดยทั่วไปล้อแม่็กส่วนใหญ่ถูกผลิตจากโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก(%wt)
ซิลิคอน	6.78
แมกนีเซียม	0.29
เหล็ก	0.171
แมงกานีส	0.0005
สังกะสี	0.009
ทองแดง	0.004
ไทเทเนียม	0.041
อะลูมิเนียม	Balance

ที่มา : อภินัฐ (2555)



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของอะลูมิเนียมเกรด A356

### 3.2.1.2 ซิลิคอนคาร์ไบด์

ซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นสารประกอบของซิลิกอน และคาร์บอน ที่มีสูตรทางเคมีคือ SiC ซึ่งจะใช้เป็นวัสดุเสริมแรง โดยจะมีความหนาแน่น 3.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดที่ใช้คือ 100-200 ไมโครเมตร

## 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เตาทหลอมโลหะ
- ข. เครื่องกวนส่วนผสมในน้ำโลหะ
- ค. แม่พิมพ์ถาวร
- ง. เครื่องตัดโลหะ(ชิ้นงาน)
- จ. เครื่องขัดชิ้นงาน
- ฉ. กระดาษทราย เบอร์ 180, 320, 600, 1000 และ 1200
- ช. ผงขัดอะลูมินา ความละเอียด 1 และ 0.3 ไมโครเมตร
- ซ. Thermo couples

### 3.2.2.2 สารเคมี

- ก. กรดไฮโดรฟลูออริก เจือจางน้ำร้อยละ 2 โดยปริมาตร
- ข. แอลกอฮอล์

### 3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์แสง
- ข. กล้องถ่ายรูป
- ค. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อแม่เหล็ก และศึกษากระบวนการ กวนหล่อ และการเทลงแม่พิมพ์ถาวร

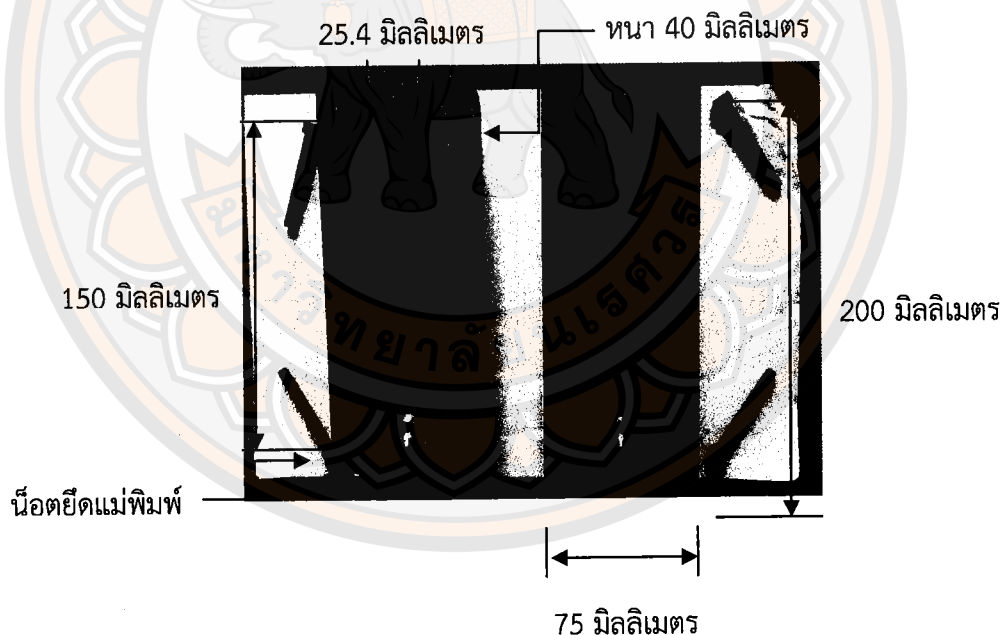
#### 3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ และอุปกรณ์

##### 3.3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- ก. เตรียมอะลูมิเนียมจากล้อรถยนต์ไปใช้เป็นส่วนผสม และเทียบเกรด
- ข. เตรียมซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาด 100-200 ไมโครเมตร

##### 3.3.2.2 การเตรียมแม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ทำจาก เหล็กกล้า ซึ่งเป็นแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ชิ้น มาประกบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ขนาดของ ชิ้นงาน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold)

##### 3.3.2.3 การเตรียมเครื่องกวนส่วนผสม

- ก. เตรียม motor ที่มีความเร็วรอบ 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที
- ข. เตรียมชุดเครื่องกวน

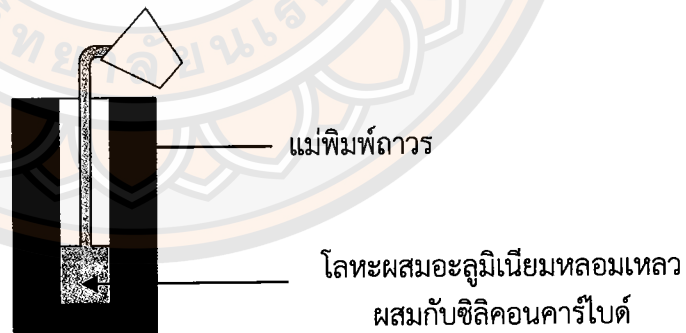
### 3.3.3 ขั้นตอนการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อแม่ึก

#### 3.3.3.1 การหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยใช้แม่พิมพ์ถาวร

- ก. นำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อแม่ึก ที่ได้เตรียมไว้มาหลอมจนในสถานะที่เป็นของเหลว
- ข. เทโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ถาวร แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยจะเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส
- ค. รอให้โลหะผสมอะลูมิเนียมแข็งตัว โดยให้เย็นตัวในแม่พิมพ์
- ง. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

#### 3.3.3.2 การหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม กับซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยใช้แม่พิมพ์ถาวร

- ก. นำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากล้อแม่ึก ที่ได้เตรียมไว้มาหลอมจนอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว
- ข. ใส่อนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เตรียมไว้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หลังจากทีอะลูมิเนียมหลอมเหลวแล้ว จากนั้นใช้เครื่องกวน กวนซิลิคอนคาร์ไบด์ในน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นเวลา 2 นาที ด้วยความเร็ว 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที
- ค. เทโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ถาวร แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยจะเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส
- ง. รอให้โลหะผสมอะลูมิเนียมแข็งตัว โดยให้เย็นตัวในแม่พิมพ์
- จ. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

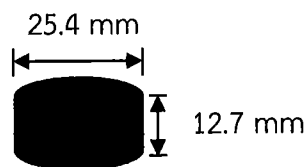


รูปที่ 3.4 ลักษณะการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร

### 3.3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบ

#### 3.3.4.1 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

- ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 4 เงื่อนไขมาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.5



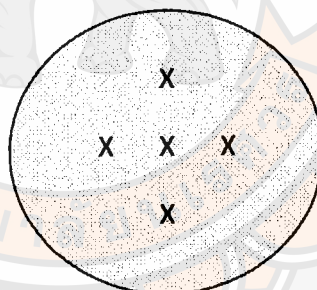
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดสอบ

ข. นำชิ้นงานทดสอบที่ตัดไว้มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 600, 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นนำมาขัดเงา โดยจะใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.3 - 1 ไมโครเมตร

ค. นำชิ้นงานมากัดกรดไฮโดรฟลูออริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร โดยการจุ่มเป็นเวลา 15 วินาที ล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วนำมาล้างด้วยแอลกอฮอล์เพื่อไล่ความชื้น เป่าให้แห้ง

จ. นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดเรียบร้อยแล้ว มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

ฉ. นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล โดยใช้หัวลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ใช้น้ำหนักกด 187.5 กิโลกรัมแรง โดยใช้เวลากด 10-15 วินาที ทำการทดสอบความแข็งทั้งหมด 5 จุด แสดงดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง

### 3.3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และสรุปผล

3.3.5.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

3.3.5.2 ศึกษาผลการวิเคราะห์เพื่อหาข้อสรุปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

3.3.5.3 สรุปผลการทดลอง

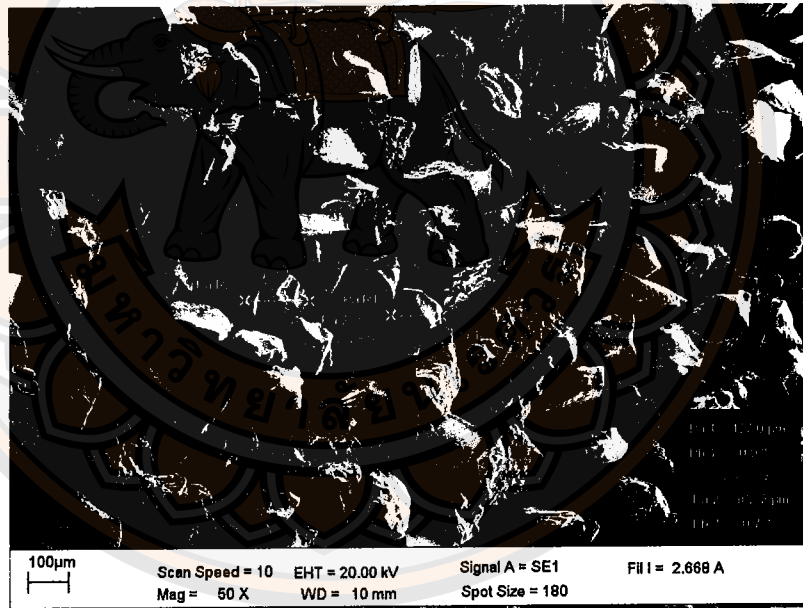
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ของชิ้นงานโลหะผสม อะลูมิเนียม เกรด A356/ซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ผ่านการทอที่อุณหภูมิเท่ากัน ส่วนผสมเท่ากัน แต่ใช้ ความเร็วทอที่แตกต่างกัน ในเรื่องของผลที่เกิดจากงานทอ โครงสร้างจุลภาค ศึกษาอัตราส่วน ระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม และความแข็งของชิ้นงาน ดังรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

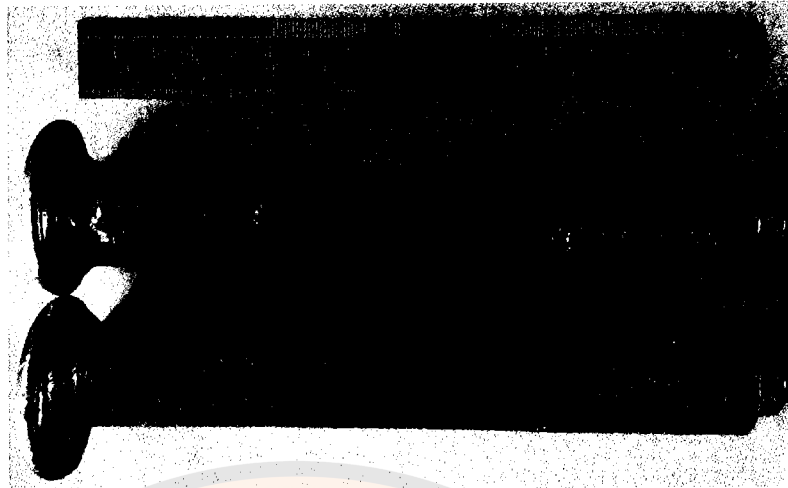
จากที่ได้ทำการถ่ายภาพอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด ขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 100-200 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 50 เท่า

#### 4.2 รูปร่างของชิ้นงานทอ

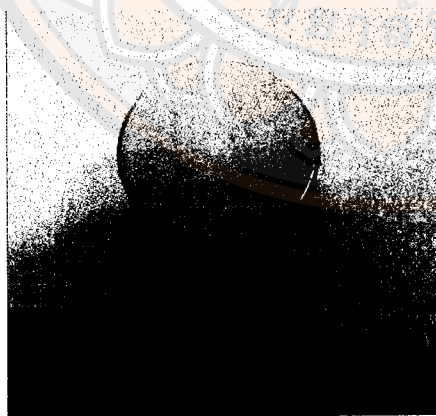
หลังจากที่ผ่านกระบวนการทอแล้ว โลหะหลอมเหลวจะถูกเทลงแบบหล่อถาวร แล้วแข็งตัว เป็นชิ้นงานทอที่เรียกว่า แท่งอินกอต (ingot) แสดงดังรูปที่ 4.2



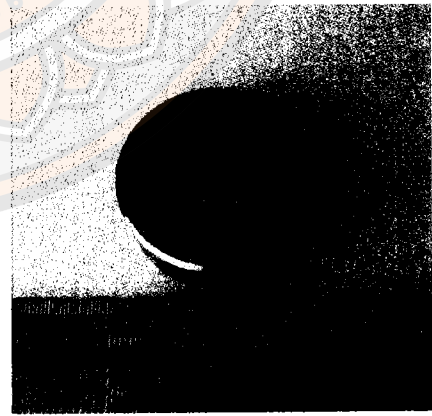
รูปที่ 4.2 แท่งอินกอต (ingot)

เมื่อได้ทำการตัดชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ และไม่ผ่านการกวน พบว่าชิ้นงานทดสอบมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ภายใน ซึ่งคาดว่าอาจเกิดขึ้นในระหว่างการเทโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งมีลักษณะการไหลของน้ำโลหะแบบปั่นป่วนหรือไม่ราบเรียบ เป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงานแสดงดังรูป 4.3 ก)

ในส่วนของชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในทุกรอบการกวนที่ใช้ พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นมีมากกว่า สาเหตุคาดว่าเกิดจากการกวนน้ำโลหะก่อนเทลงสู่แม่พิมพ์ โดยทำการกวนนอกเตาหลอมอาจทำให้เกิดการละลายของอากาศ และแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมได้ง่ายขึ้น ซึ่งอากาศและแก๊สจะเกิดการรวมตัวกันในระหว่างการแข็งตัว เป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Hashim และคณะ แสดงดังรูปที่ 4.3 ข)



ก)



ข)

รูปที่ 4.3 รูพรุนภายในชิ้นงานทดสอบที่พบหลังจากเทลงสู่แม่พิมพ์ถาวร

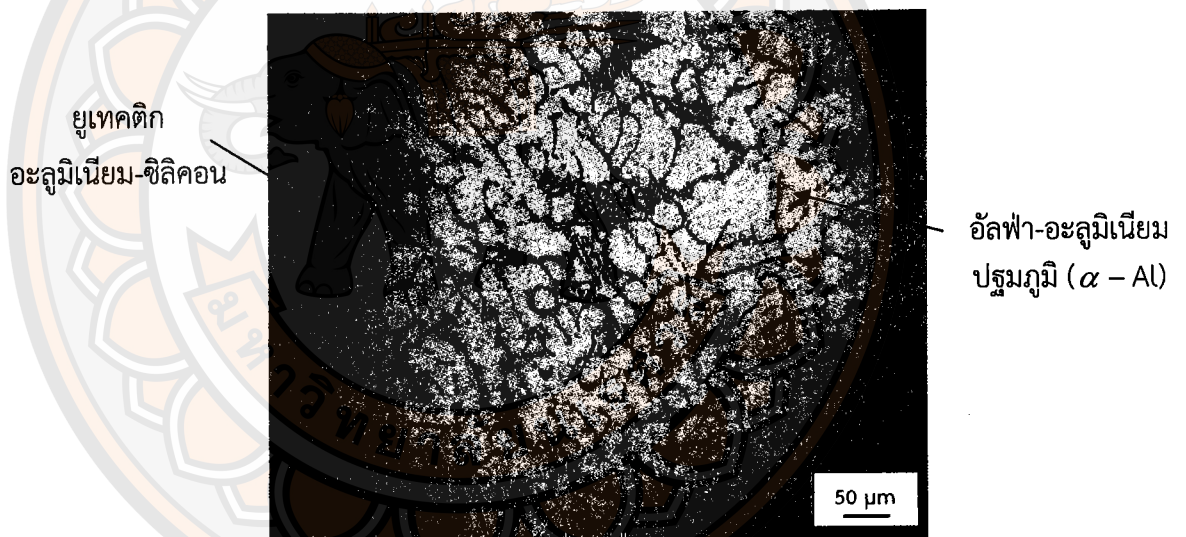
- ก) ชิ้นงานที่ไม่ผสมซิลิคอนคาร์ไบด์
- ข) ชิ้นงานที่ผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วกวน 490 รอบต่อนาที

### 4.3 โครงสร้างจุลภาค

โครงการนี้โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วย 4 สภาวะ สำหรับชิ้นงานที่ไม่ผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ และชิ้นงานที่ผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการกวนหล่อด้วยความเร็วรอบ 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที

#### 4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยไม่ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์

ชิ้นงานนี้จะใช้เป็นตัวอ้างอิงในเชิงโครงสร้างจุลภาค ซึ่งชิ้นงานนี้ได้ผ่านการหลอมละลาย และเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส โดยไม่ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ จากที่ได้กล่าวมาในบทข้างต้นแล้วว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 ประกอบด้วยซิลิคอนเป็นธาตุหลัก เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทไฮโปยูเทคติก โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นสีดำแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.4

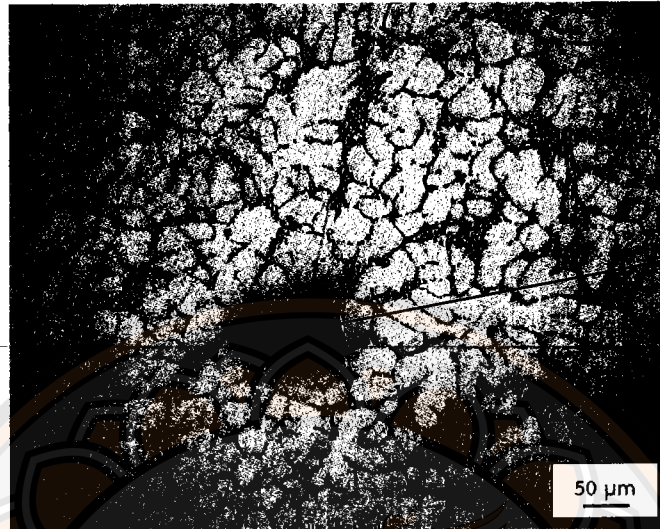


รูปที่ 4.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356

#### 4.3.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วกวน 210 รอบต่อนาที

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 กับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ทำการกวนที่ความเร็ว 210 รอบต่อนาที จากนั้นเทลงแม่พิมพ์ถาวรที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และพบหลุมที่เกิดจากการหลุดของซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในชิ้นงาน เนื่องจากขนาดของหลุมที่พบมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งสาเหตุคาดว่าเกิดจากการเป็ยกผิวที่ตำระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ส่งผลให้การ

เปียกผิว (Wettability) ระหว่างอนุภาค และเนื้อพื้นมีค่าต่ำ ทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดออกได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 4.5

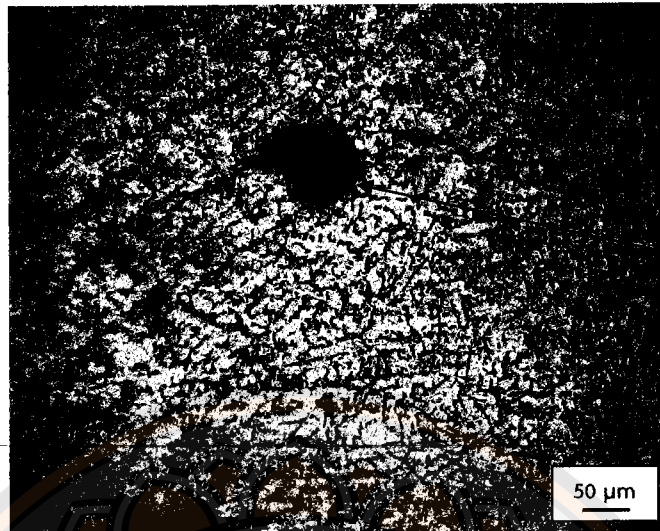


หลุมที่เกิดจาก  
SiC หลุดออกไป

รูปที่ 4.5 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วรอกวน 210 รอบต่อนาที

#### 4.3.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วรอกวน 340 รอบต่อนาที

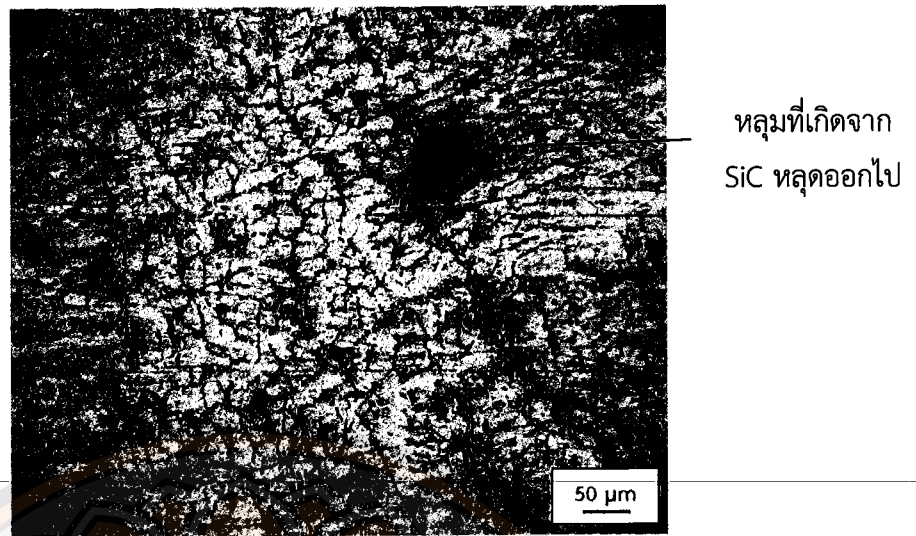
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 กับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการกวนที่ 340 รอบต่อนาที พบว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และพบหลุมที่เกิดจากการหลุดของซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในชิ้นงาน เนื่องจากขนาดของหลุมที่พบมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งสาเหตุคาดว่าเกิดจากการเปียกผิวที่ต่ำระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ส่งผลให้การเปียกผิวระหว่างอนุภาค และเนื้อพื้นมีค่าต่ำ แต่จากความเร็รรอบที่ใช้ในการกวนมีค่าสูงขึ้น จึงเกิดแรงทางกลที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ความตึงผิวของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีค่าลดลง การเปียกผิวมีค่าดีขึ้น ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและเนื้อพื้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Hashim และคณะ แต่เมื่อทำการขัดชิ้นงานพบว่า มีหลุมที่เกิดจากการหลุดของซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น และจากภาพโครงสร้างจุลภาคยังไม่พบซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วรอกวน 340 รอบต่อนาที

#### 4.3.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วรอกวน 490 รอบต่อนาที

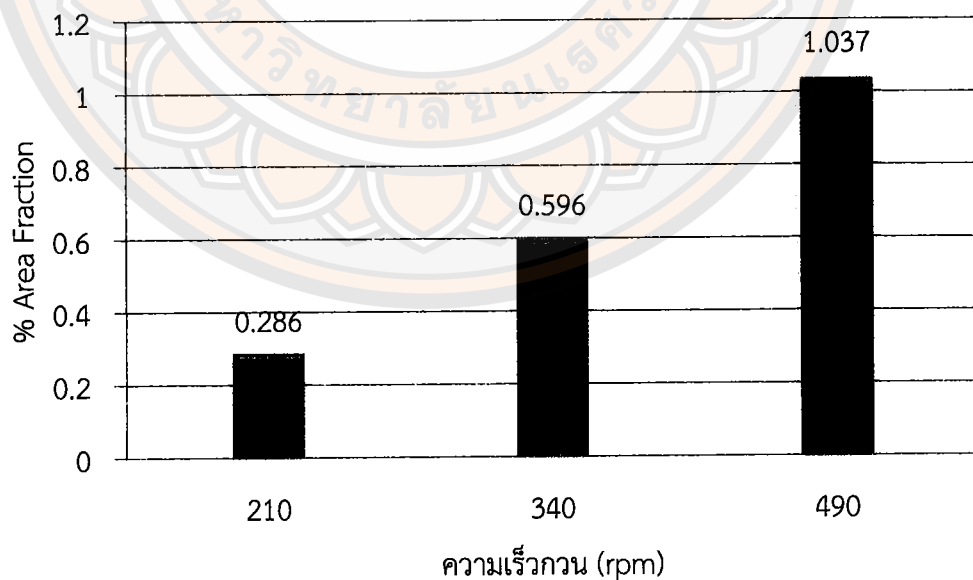
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 กับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรอกวนที่ 490 รอบต่อนาที พบว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และพบหลุมที่เกิดจากการหลุดของซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในชิ้นงาน เนื่องจากขนาดของหลุมที่พบมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งสาเหตุคาดว่าเกิดจากการเปื่อยกฉิวที่ต่ำระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ส่งผลให้การเปื่อยกฉิวระหว่างอนุภาค และเนื้อพื้นมีค่าต่ำ แต่จากความเร็รรอบที่ใช้ในการรอกวนมีค่าสูงขึ้น จึงเกิดแรงทางกลที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ความตึงฉิวของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีค่าลดลง การเปื่อยกฉิวมีค่าดีขึ้น ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และเนื้อพื้นก็จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Hashim และคณะ แต่เมื่อทำการขัดชิ้นงานพบว่า มีหลุมที่เกิดจากการหลุดของซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานมากกว่าความเร็รรอกวนอื่นๆ เพราะว่าแรงเสียดสีที่เกิดขึ้นในระหว่างการขัดชิ้นงานมีค่าสูงจึงทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดออก และจากภาพโครงสร้างจุลภาคยังไม่พบซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356-5% ซิลิคอนคาร์ไบด์ ความเร็วการวน 490 รอบต่อนาที

#### 4.4 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม (Area Fraction) เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สามารถผสมเข้าไปได้จริง ในชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A 356 โดยการนำพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์ในรูปโครงสร้างจุลภาค มาเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด ในทุกสภาวะความเร็วการวน 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที ผลการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ปริมาณอนุภาคในชิ้นงานหล่อที่ใช้ความเร็วในการการวน 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที

โดยผลการทดลอง % Area Fraction ของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยผสมกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าที่ความเร็วรอบในการถลุง 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที พบปริมาณพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในเนื้อชิ้นงานร้อยละ 0.286, 0.596 และ 1.037 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงไป เนื่องจากการเป็ยกผิวที่ต่ำระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น มีแรงทางกลในระหว่างถลุงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้แรงดึงผิวของน้ำโลหะลดลง มีการปรับปรุงการเป็ยกผิวที่ดีขึ้น จึงสามารถพบปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Hashim และคณะ

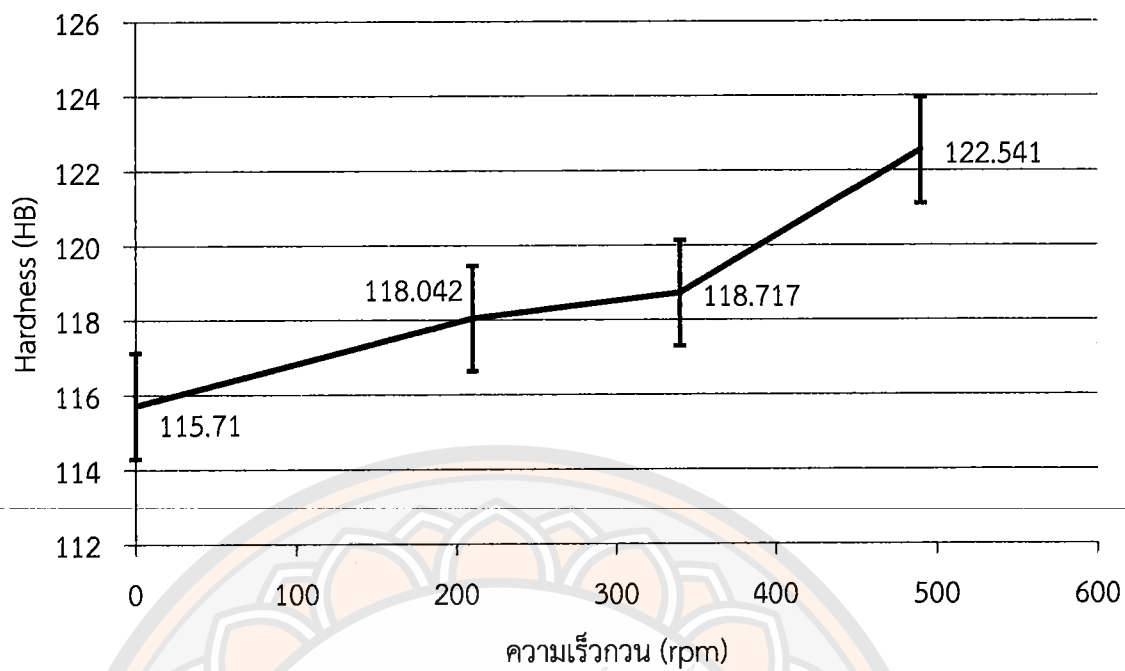
ในส่วนของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่หายไปนั้น เนื่องจากขณะที่เทน้ำโลหะหลอมเหลวที่ผ่านการถลุงแล้วเทเข้าสู่แม่พิมพ์ถาวร พบว่าอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์จะตกลงสู่ก้นเข้าหลอมเนื่องจากความหนาแน่นของซิลิคอนคาร์ไบด์คาร์ไบด์ (3.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีมากกว่าความหนาแน่นของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว (2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

#### 4.5 ความแข็ง

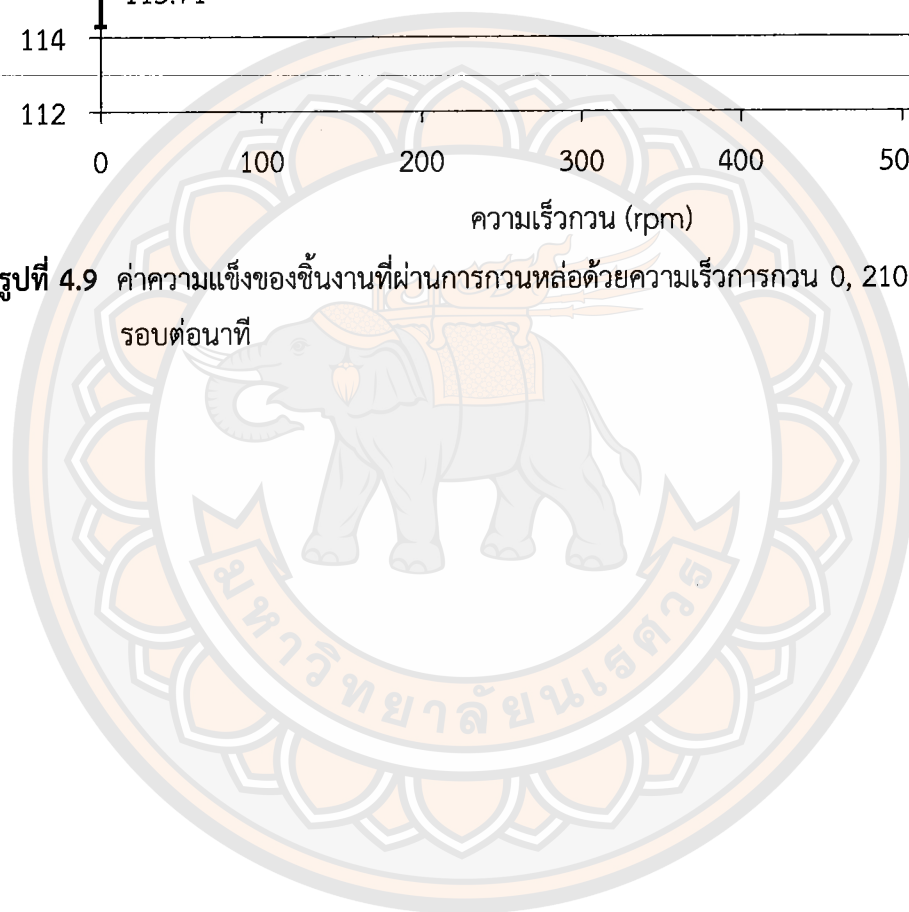
ในการขึ้นรูปโลหะที่สภาวะแตกต่างกันจะต้องมีค่าความแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการถลุงหล่อ และโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการถลุงด้วยความเร็วถลุง 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที

##### 4.5.1 เปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม และโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการถลุงด้วยความเร็วถลุง 210, 340 และ 490 รอบต่อ นาที

จากการทดสอบความแข็งโดยการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยไม่ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่าความแข็งเฉลี่ย 115.710 HB และเมื่อนำโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการถลุงด้วยความเร็วถลุง 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยเป็น 118.042 HB, 118.717 HB และ 122.541 HB ตามลำดับ ที่ความเร็ว 490 รอบต่อ นาที มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งคาดว่าจากความเร็วรอบที่ใช้ในการถลุงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความดึงผิวของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีค่าลดลง การเป็ยกผิวมีค่าดีขึ้น จึงเกิดแรงทางกลที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค และเนื้อพื้นมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้จากการเปรียบเทียบ แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการกวนหล่อด้วยความเร็วการกวน 0, 210, 340 และ 490 รอบต่อนาที



## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหาของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.1 บทสรุป

5.1.1 เมื่อทำการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เมื่อทำการเทน้ำโลหะหลอมเหลวใส่แม่พิมพ์ถาวรแล้ว พบว่ามีอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หลงเหลืออยู่ในเบ้าเทในปริมาณมาก เนื่องจากการเปียกผิวที่ต่ำ

5.1.2 ที่ความเร็วของการกวนน้ำโลหะ พบว่าที่ความเร็วในการกวนน้ำโลหะ 210 รอบต่อนาที พบซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในโลหะพื้นร้อยละ 0.286 เนื่องจากความเร็วรอบในการกวนน้ำโลหะนั้นมีค่าต่ำไป จึงไม่เพิ่มโอกาสในการเปียกผิวระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมและอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์

5.1.3 ในการกวนน้ำโลหะที่ความเร็วในการกวน 340 และ 490 รอบต่อนาที พบซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในโลหะพื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.596 และ 1.037 ตามลำดับ อีกทั้งยังพบรูพรุนในชิ้นงานเนื่องจากมีความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น

5.1.4 จากผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่ามีปริมาณของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 โดยชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นจำนวนมากจะทำให้มีค่าความแข็งสูงด้วย

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 สำหรับการกระจายตัวของอนุภาค การกวนหล่อช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนที่เหมาะสม รวมไปถึงการเตรียมผิวอนุภาคที่จะใช้ในการทดลอง เช่น

5.2.1.1 การเพิ่มธาตุผสม (alloying element) เช่น แคลเซียม ไทเทเนียม แมกนีเซียม และ โซโครเนียม เป็นต้น ซึ่งธาตุที่มีผลดีที่สุด คือ แมกนีเซียม โดยแมกนีเซียมจะช่วยกำจัดออกซิเจนบริเวณพื้นผิวของอนุภาค นำไปสู่การเพิ่มพลังงานพื้นผิว และจะทำให้อนุภาคยึดติดกับเนื้อพื้นได้ดีขึ้น เพิ่มความแข็งแรงของเนื้อพื้น

5.2.1.2 การปรับสภาพอนุภาค (Particle treatment) คือ นำอนุภาคมาให้ความร้อนในอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะเกิดการกระจายของอนุภาคในโลหะหลอมเหลว ทำให้ก๊าซบริเวณผิวของอนุภาคถูกดูดซึมออกไป รวมทั้งการทำให้บริเวณผิวของอนุภาคมีความสะอาด เพื่อเพิ่มการเปียกผิว และแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาค

5.2.1.3 การเคลือบผิวอนุภาค (Particle coating) คือการนำอนุภาคมาเคลือบกับโลหะที่มีสมบัติการเปียกผิวที่ดี เช่น นิกเกิล ทองแดง และ โครเมียม เป็นต้น ซึ่งเมื่อเคลือบโลหะลงบนอนุภาค จะทำให้อนุภาคมีการเปียกผิวที่ดีขึ้น

จากกระบวนการดังกล่าวจะช่วยให้การเปียกผิวระหว่างโลหะพื้นและอนุภาคดีขึ้น จึงส่งผลต่อการเข้ากันได้ดี

5.2.2 การหล่อโลหะโดยใช้วิธีการกวนหล่อ สามารถนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบอื่นได้ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานได้ เช่น การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเท

### 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 เกิดรูพรุนในชิ้นงาน โดยรูพรุนเกิดจากการเหน้าโลหะลงสู่แม่พิมพ์ รวมไปถึงการกวนน้ำโลหะ ทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นในชิ้นงาน ดังนั้นขณะทำการกวนน้ำโลหะ ควรมีการดูดก๊าซที่เกิดขึ้นออกไปด้วย

5.3.2 ผิวชิ้นงานที่ไม่เรียบ เนื่องจากเมื่อทำการเหน้าโลหะ เมื่อน้ำโลหะสัมผัสกับแม่พิมพ์ถาวร จะเกิดการเย็นตัวเร็วเกินไป จึงควรทำการอุ่นแม่พิมพ์ถาวรก่อนการเหน้าโลหะ เพื่อลดปัญหาความไม่เรียบที่บริเวณผิวของชิ้นงาน

5.3.3 จากชิ้นงานทดสอบ พบว่าอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ เกิดการยึดติดกับโลหะพื้นได้ในปริมาณน้อยเนื่องจากการเปียกผิวที่ไม่ดี ดังนั้นจึงควรทำการเตรียมผิวของอนุภาคก่อนนำไปใช้ทดลอง เพื่อให้มีค่าการเปียกผิวที่ดีขึ้น

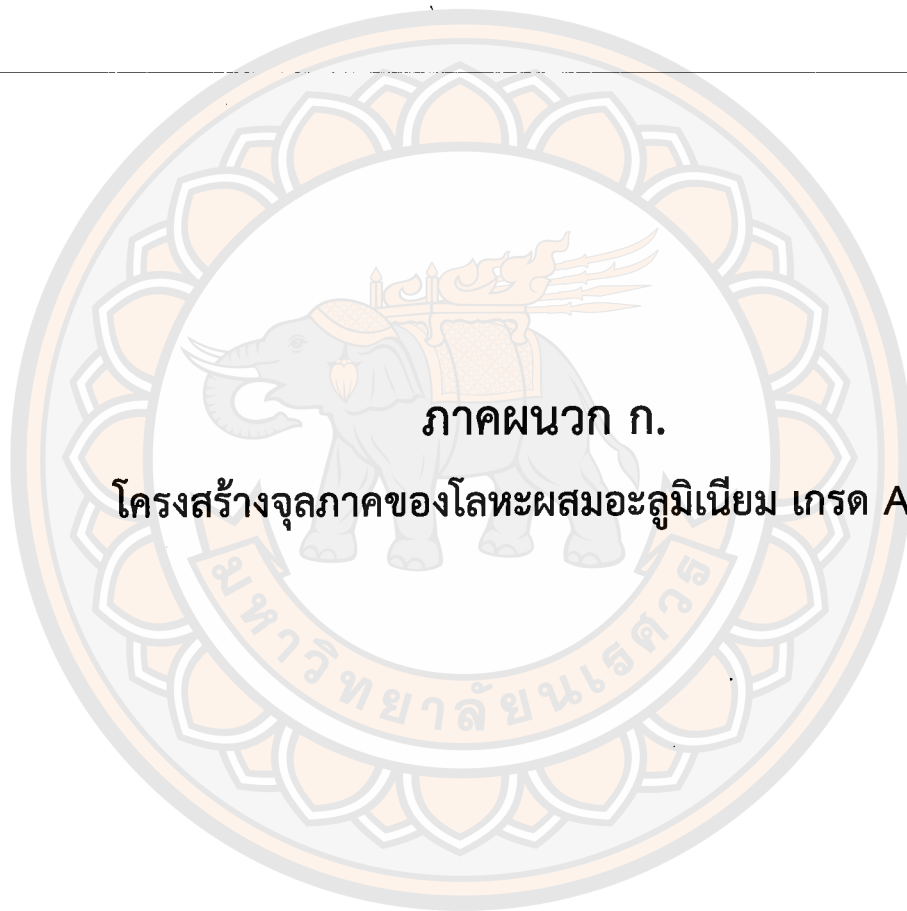
5.3.4 ขณะทำการหล่อโลหะอาจเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ จึงควรสวมใส่ชุด และอุปกรณ์ป้องกันทุกครั้งที่ปฏิบัติงาน

## เอกสารอ้างอิง

- กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ. (2553). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: พงษ์วรรณการพิมพ์ จำกัด.
- ขวลิต เชียงกุล. (2542). *โลหะวิทยา*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- เขาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (2551). *โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ*. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2555, จาก <http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi001.pdf>.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2554). *การแพร่ของอะตอมและการแข็งตัวของโลหะ*. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2555, จาก <http://www.mme.ea-rmuti.com/wp-content/uploads/2011/09/Chapter-3.pdf>.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- นภิสพร มีมงคล. (2548). *โลหะกรรมวัสดุผง*. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มานพ ตันตระกูลบัณฑิตย์. (2546). *งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. (2551). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล.
- สุทธาวัดย์ อิมอุไร และคณะ. (2548). *โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Abdallah W. et al. (2007). *Fundamentals of Wettability*. Oilfield Review.
- Amirkhanlou S. (2010). *Synthesis and characterization of A356-SiC<sub>p</sub> composites by stir casting and compocasting methods*. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 20. 788-793
- ASM Handbook Vol 9. *Light Microscopy, Metallography and Microstructures*. ASM International.
- ASTM Standard Vol 03.01. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- ASTM Standard Vol 03.01. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.
- Dr. John T.H. Pearce. (2544). *ข้อบกพร่องในงานหล่อโลหะ สาเหตุและวิธีการแก้ไข*. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
- Eustathopoulos, N.; Nicholas, M.G. and Drevet B. (1999). *Wettability at high temperatures*. Oxford, UK: Pergamon.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)


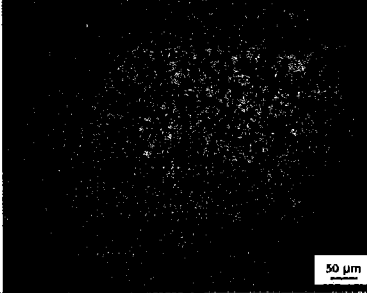





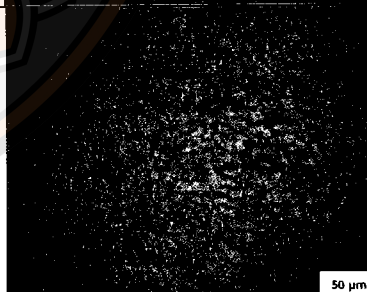
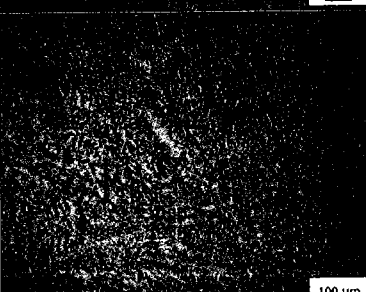
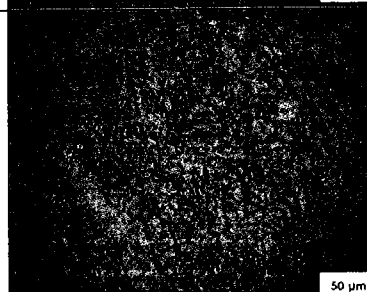
- Hashim J. (2001). **The Production of Cast Metal Matrix Composite by A Modified Stir Casting Method.** Jurnal Teknologi. 35. 9-20.
- Hashim J. et al. (2001). **The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy.** Jurnal of Materials Processing Technology. 119. 324-328.
- Manoj,S. et al. (2009). **Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite.** Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering.8.455-467.
- Mel M. Schwartz. (1997). **Composite materials.** Upper Saddle River,New jersey: Prentice-Hall,Inc.
- Mohammad, B.N. and Akpan, P.P. (2007). **Behavior of Alunium Alloy Castings under Different Pouring Temperatures and Speeds.** Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies.6.71-80.
- Neelima, D.C. et al. (2011). **Mechanicl characterization of Aluminium silicon carbide composite.** International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul.1.793-799.
- Shasha Y. et al. (2012). **Influence of stirring speed on SiC particles distribution in A356 liquid.** China Foundry. 9. 154-158



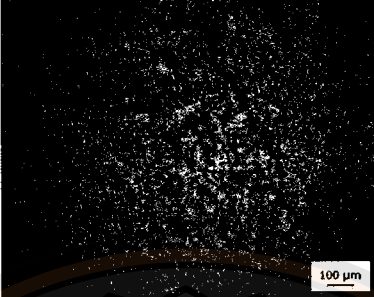
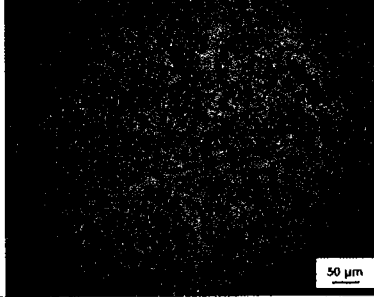
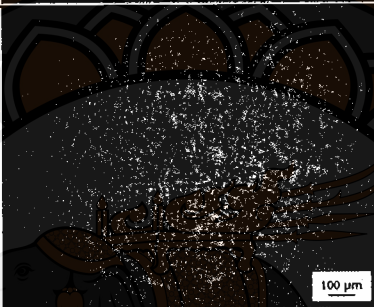
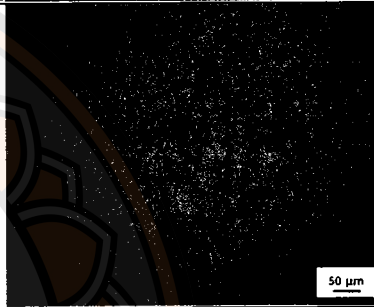

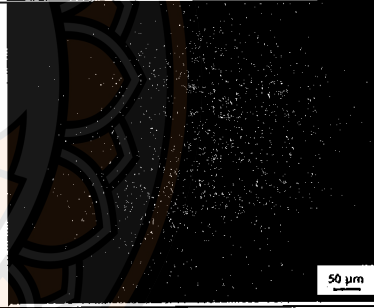
ภาคผนวก ก.

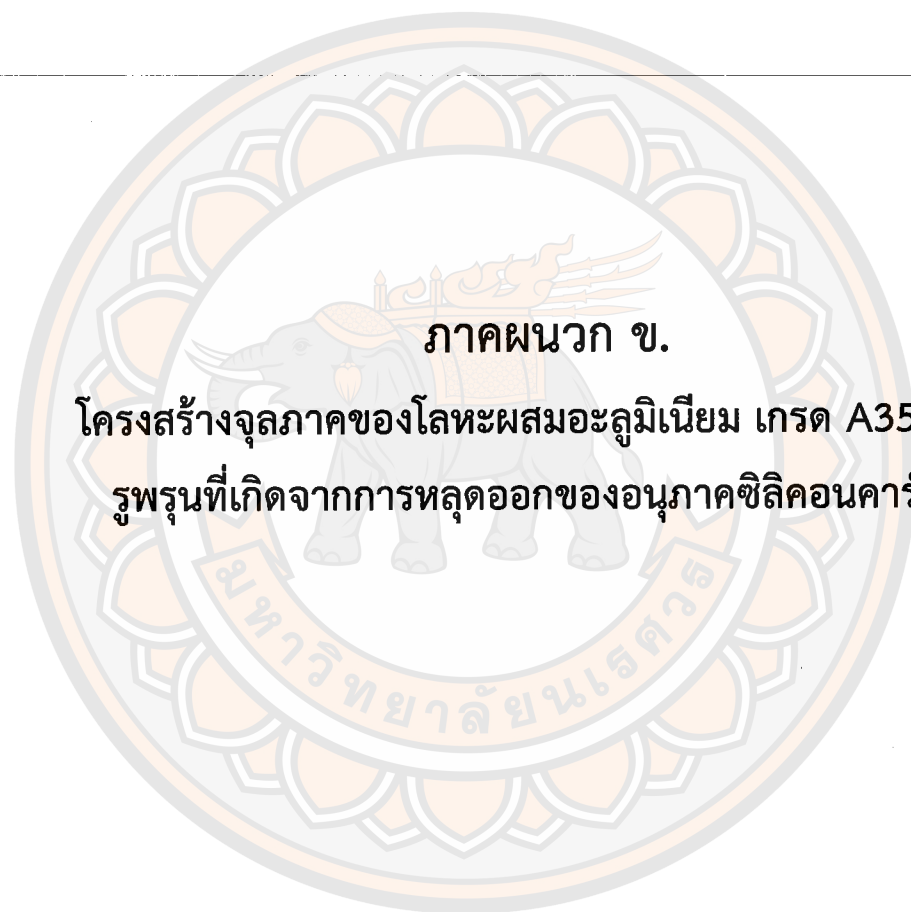
โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356

ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส

กำลังขยาย ตำแหน่ง	50 เท่า	100 เท่า
		
บน		
		
		
ล่าง		

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส


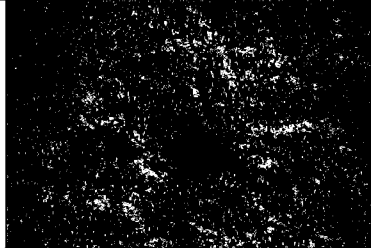
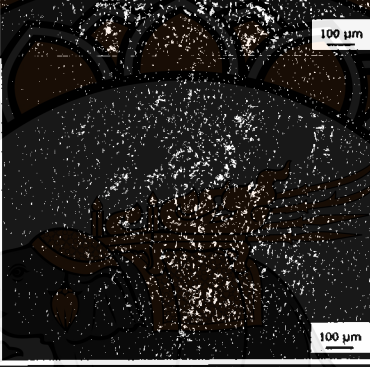
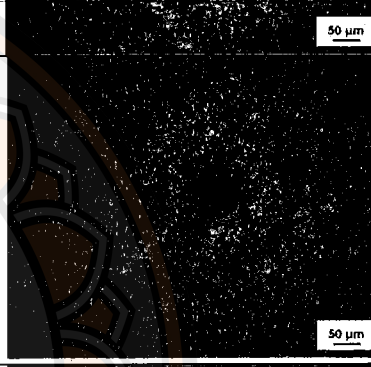


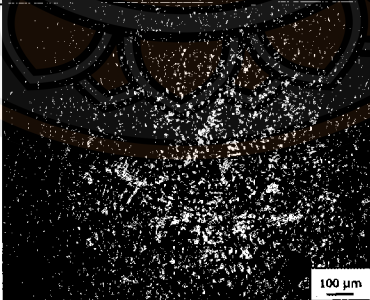
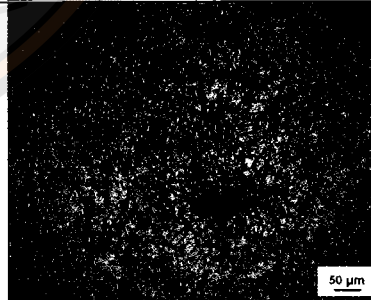
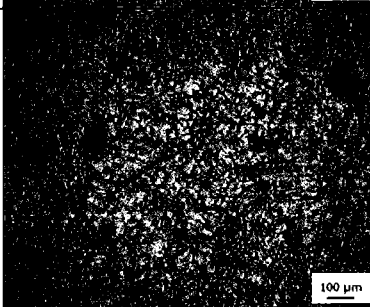
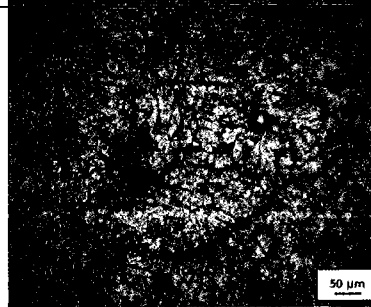
กำลังขยาย ตำแหน่ง	50 เท่า	100 เท่า
		
ล่าง		
		



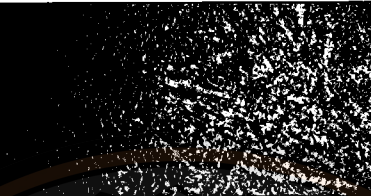
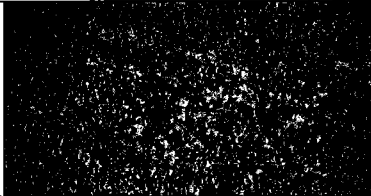

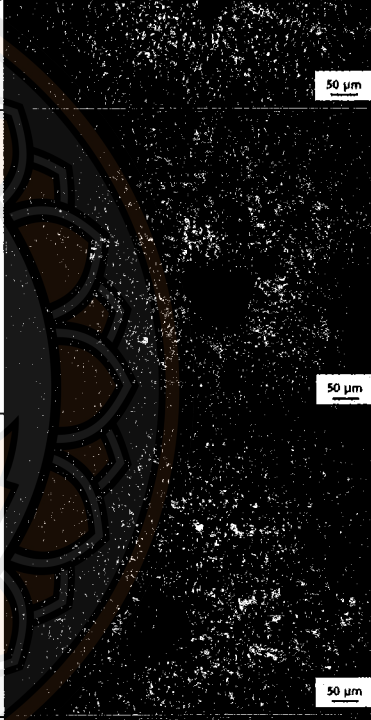

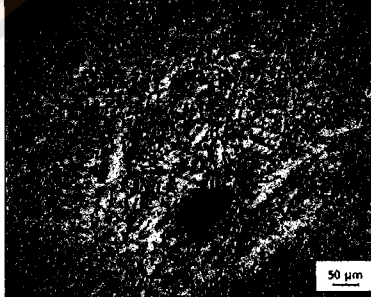
ภาคผนวก ข.

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 และ  
รูพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

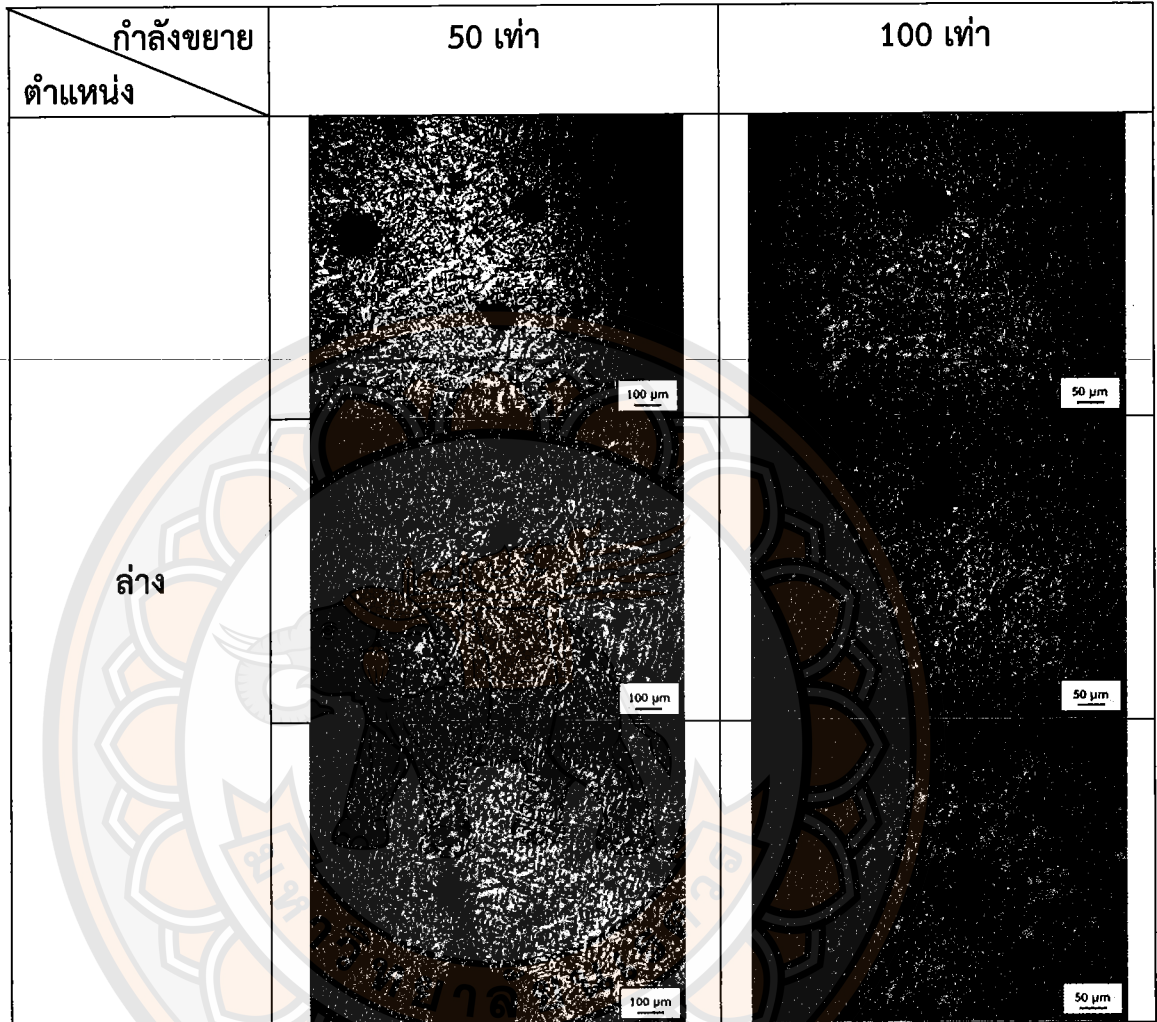
ตารางที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 และรูพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวาดด้วยความเร็ว 210 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส

กำลังขยาย ตำแหน่ง	50 เท่า	100 เท่า
		
บน		
		
ล่าง		
		


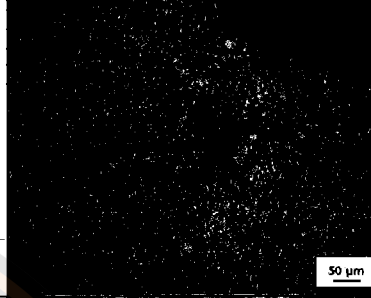
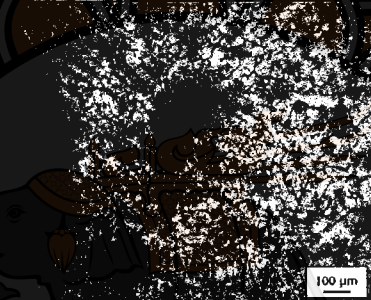
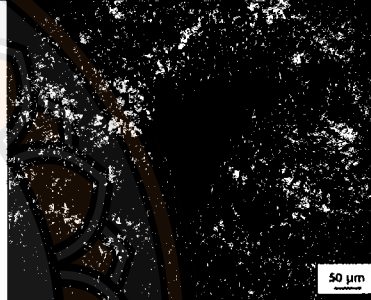


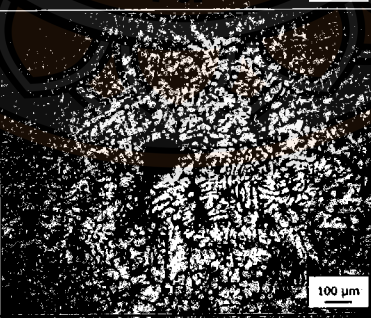

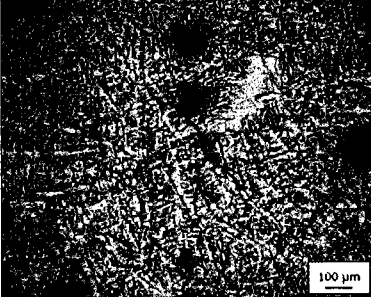

ตารางที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 และรูปพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวาดด้วยความเร็ว 340 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส

กำลังขยาย ตำแหน่ง	50 เท่า	100 เท่า
		
บน		
ล่าง		

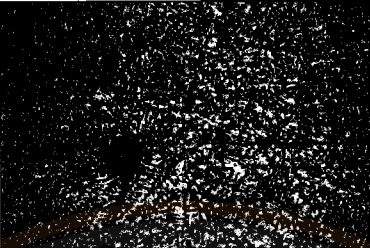

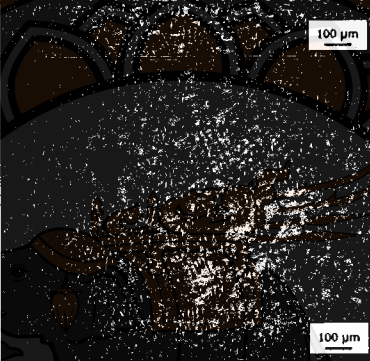
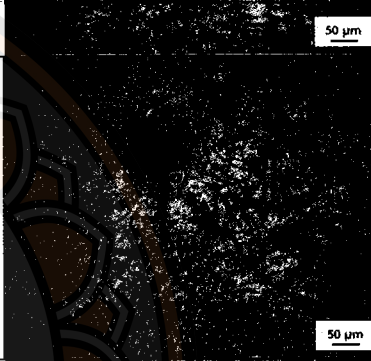
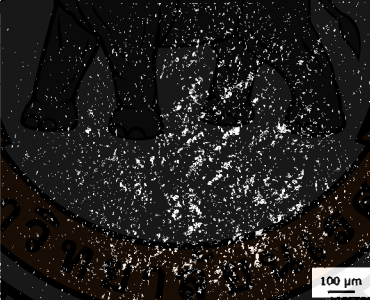
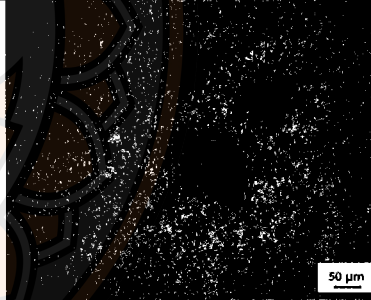
ตารางที่ ข.2 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 และรูพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวาดด้วยความเร็ว 340 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส

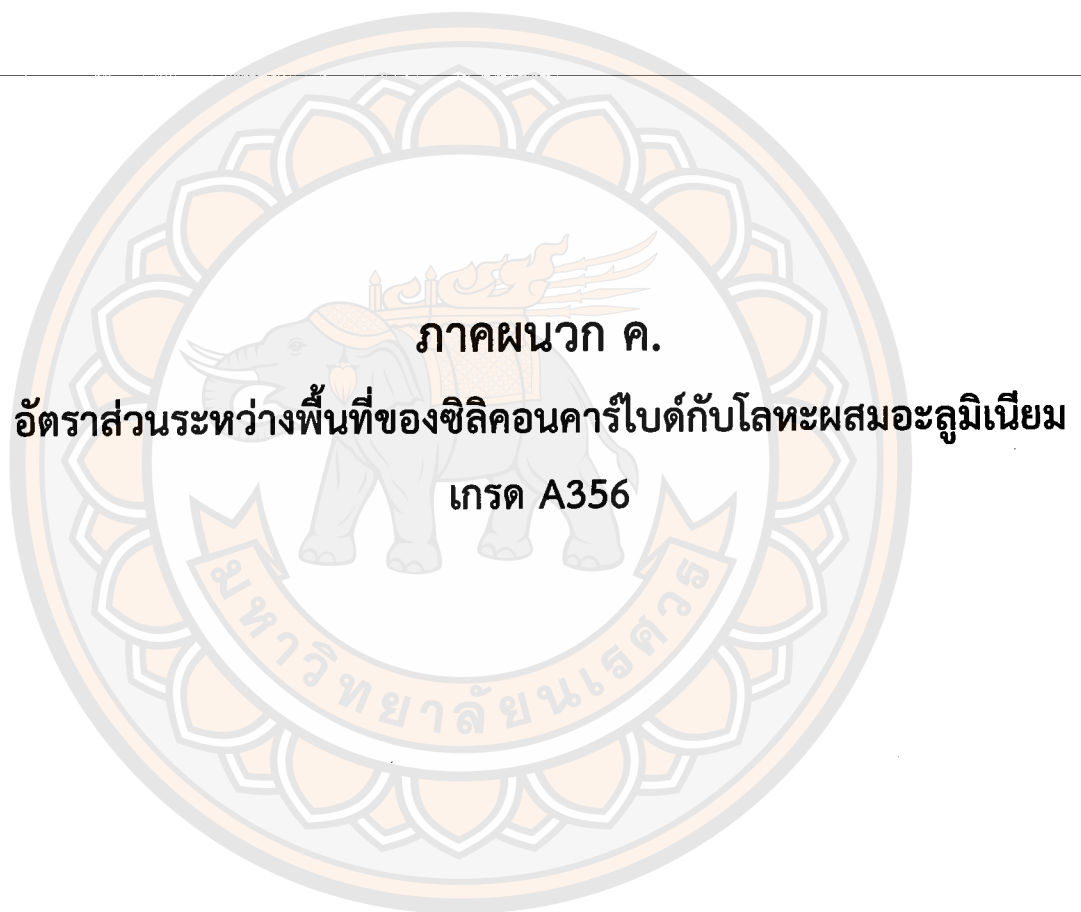


ตารางที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 และรูปพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวาดด้วยความเร็ว 490 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส

กำลังขยาย ตำแหน่ง	50 เท่า	100 เท่า
บน		
		
		
		
ล่าง		

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356 และรูพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยผ่านการกวาดด้วยความเร็ว 490 รอบต่อนาที และ ผ่านการเทที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส

กำลังขยาย ตำแหน่ง	50 เท่า	100 เท่า
		
ล่าง		
		



ภาคผนวก ค.

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม

เกรด A356

ตารางที่ ค.1 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่ผ่านการกรวน ด้วยความเร็ว 210 รอบต่อนาที

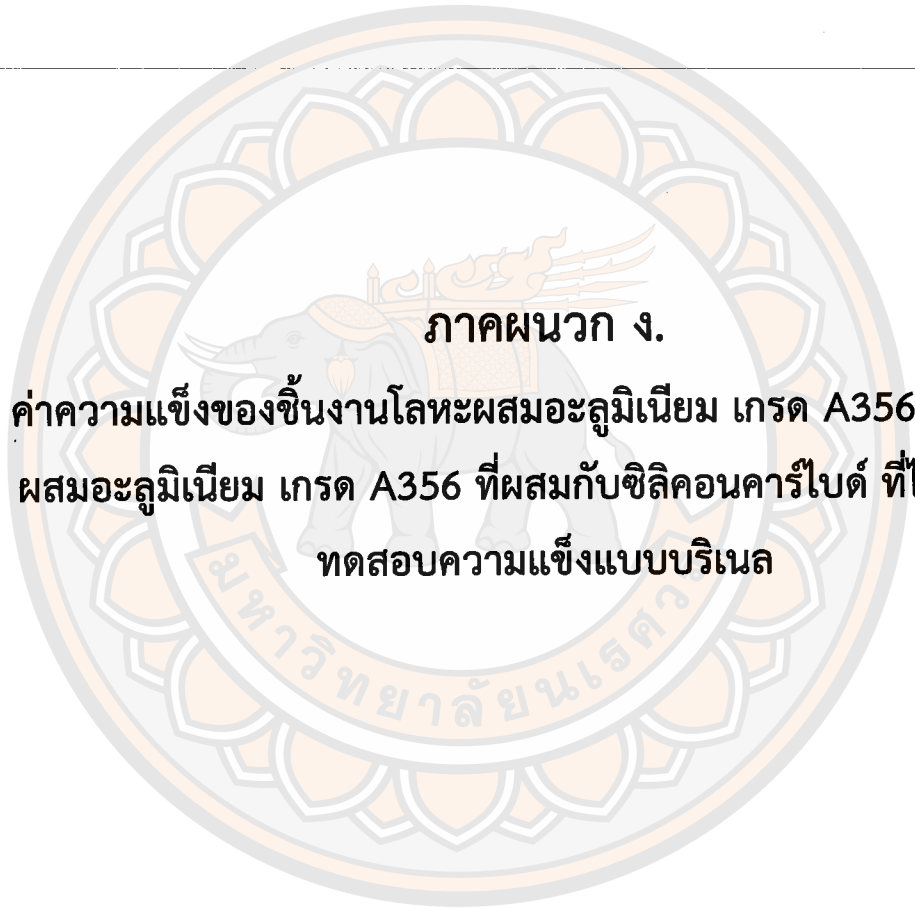
ความเร็วกรวน (rpm)	พื้นที่ SiC ( $\mu\text{m}^2$ )		%Area Fraction	
	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 100 เท่า	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 100 เท่า
210	4047.04	3151.71	0.160	0.412
	2994.20	2321.42		
	5550.68	3791.92		
	5821.80	1802.83		
	1453.97	1036.47		
	0	0		
	0	0		
	0	0		
ค่าเฉลี่ย	2483.461	1513.044	0.286	

ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่ผ่านการกรวน ด้วยความเร็ว 340 รอบต่อนาที

ความเร็วกรวน (rpm)	พื้นที่ SiC ( $\mu\text{m}^2$ )		%Area Fraction	
	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 100 เท่า	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 100 เท่า
340	1631.21	1548.67	0.247	0.945
	8026.12	7259.50		
	3977.36	3303.41		
	4877.71	4084.39		
	5293.05	4874.87		
	3972.55	3903.66		
	2768.52	2792.94		
	0	0		
ค่าเฉลี่ย	3818.315	3470.930	0.596	

ตารางที่ ค.3 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่ผ่านการกรน ด้วยความเร็ว 490 รอบต่อนาที

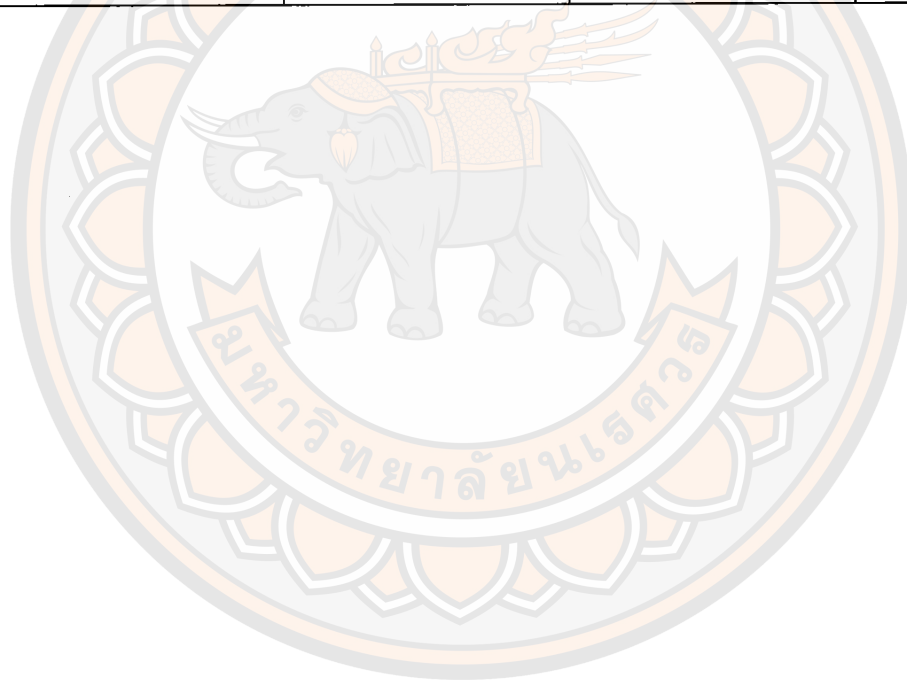
ความเร็วกรน (rpm)	พื้นที่ SiC ( $\mu\text{m}^2$ )		%Area Fraction	
	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 100 เท่า	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 100 เท่า
490	2383.33	1764.18	0.479	1.594
	12297.74	9875.17		
	9637.84	6768.53		
	8268.94	7108.97		
	5170.17	3288.73		
ค่าเฉลี่ย	7415.160	5853.451	1.037	



**ภาคผนวก ง.**  
**ค่าความแข็งของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 และโลหะ  
ผสมอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ได้จากการ  
ทดสอบความแข็งแบบบริเนล**

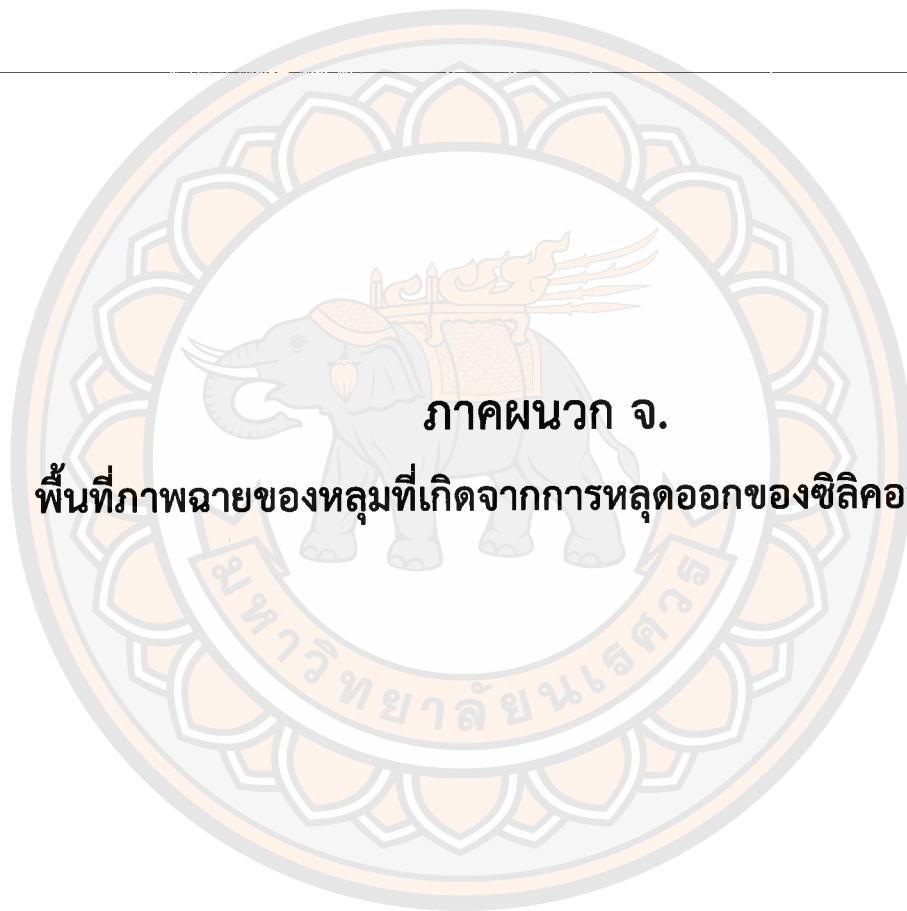
ตารางที่ ง.1 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A356

ความเร็วหมุน (rpm)	ตำแหน่ง	ค่าความแข็ง (HB)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)
0	บน	114.02	115.71
		116.25	
		125.78	
		116.25	
		116.25	
	กลาง	120.89	
	111.84		
	ล่าง	116.25	
	123.30		
	96.29		



ตารางที่ ง.2 ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ความเร็วแกน (rpm)	ตำแหน่ง	ค่าความแข็ง (HB)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)
210	บน	119.70	118.042
		125.78	
		123.30	
		118.54	
		116.25	
	ล่าง	114.02	
		114.02	
		118.54	
340	บน	118.54	118.717
		118.54	
		118.54	
		122.09	
		118.54	
	ล่าง	114.02	
		117.38	
		123.30	
		123.30	
		112.92	
490	บน	116.25	122.541
		111.84	
		111.84	
		111.84	
		111.84	
	ล่าง	133.64	
		130.95	
		125.78	
		135.02	
		136.41	



ภาคผนวก จ.

พื้นที่ภาพถ่ายของหลุมที่เกิดจากการหลุดออกของซิลิโคนคาร์ไบด์

ตารางที่ จ.1 พื้นที่ภาพฉายของหลุมที่เกิดจากการหลุดออกของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการกวาดด้วยความเร็วกวาดต่าง ๆ

ตำแหน่ง	พื้นที่ SiC ( $\mu\text{m}^2$ )	210 rpm	340 rpm	490 rpm
บน		4047.04	1631.04	2383.33
		2994.20	8026.12	12297.74
		3151.71	3977.36	9637.84
		2321.42	1548.67	8268.94
		-	725.50	1764.18
		-	3303.41	9875.17
		-	-	6768.53
ล่าง		-	-	7108.97
		5550.68	4877.71	5170.17
		5821.80	5293.05	9743.58
		1453.97	3972.55	5481.52
		3791.92	2768.52	6338.16
		1802.83	4084.39	3288.73
		1036.47	4874.87	8239.17
		-	3903.66	4932.71
	-	2792.94	4796.15	
พื้นที่ SiC เฉลี่ย ( $\mu\text{m}^2$ )		3197.204	3698.556	6630.931