

สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย  
อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีกวนผสม

นางสาวรุ่งอรุณ บุญถ่าน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2554

**MECHANICAL PROPERTIES OF STIR-MIXED  
SiC<sub>p</sub>-REINFORCED ALUMINIUM COMPOSITES**

**Roongarun Buntan**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2011**

สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย  
อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีกวนผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร. อุษณีย์ กิตกัธธร)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร. รุอาปนีย์ พัชรวีชญ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร. รัตนา บริสุทธีกุล)

กรรมการ

(ผศ. ดร. สุขเกษม กิ่งวานตระกูล)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รุ่งอรุณ บุญถ่าน : สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีกวนผสม (MECHANICAL PROPERTIES OF STIR-MIXED SiC<sub>p</sub>-REINFORCED ALUMINIUM COMPOSITES) อาจารย์ที่ปรึกษา:  
อาจารย์ ดร.ฐาปนีย์ พัชรวิษณุ, 131 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีกวนผสม โดยใช้โลหะพื้นเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 356 และใช้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเฉลี่ย 10.5 ไมโครเมตร ปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมคือ 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเริ่มจากหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิในน้ำโลหะมาที่ 615 องศาเซลเซียสเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ตามปริมาณที่กำหนด กวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที และทำการเทหล่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ก่อนขึ้นตอกวนผสมได้ทำการปรับปรุงผิวของอนุภาค โดยให้ความร้อนแก่ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ในการทดลองมีการเติมแมกนีเซียม สารลดขนาดเกรน และสารปรับปรุงรูปทรงฐานของยูเทคติกซิลิคอนลงในน้ำโลหะขณะหลอมเหลว วัสดุเชิงประกอบที่ได้จะถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง วิเคราะห์ปริมาณเฟสโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ตรวจสอบความหนาแน่น ทดสอบความแข็งแบบบริเนล ทดสอบแรงดึง และตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สม่ำเสมอในโลหะพื้น และมีความแข็งและความแข็งแรงที่ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นและมีกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลทำให้ความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลลดลง และจากการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึง พบว่าวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีลักษณะของพื้นผิวการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ นอกจากนี้พบว่ารูพรุนที่เกิดจากแก๊สเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ROONGARUN BUNTAN : MECHANICAL PROPERTIES OF  
STIR-MIXED SiC<sub>p</sub>-REINFORCED ALUMINIUM COMPOSITES.

THESIS ADVISOR : TAPANY PATCHARAWIT, Ph.D., 131 PP.

SILICON CARBIDE/ALUMINIUM/METAL MATRIX COMPOSITE/ STIR  
CASTING

The objective of this research is to study the impact of the amounts of silicon carbide particulate (SiC<sub>p</sub>) on mechanical properties of aluminium composites fabricated by stir-mixed casting process. Aluminium 356 was used as a metal matrix and SiC<sub>p</sub> of 10.5 μm average size was added at 10 and 15 wt.% additions. The composite was prepared by melting of aluminium ingots at 700 °C, followed by SiC<sub>p</sub> addition at 615 °C, using 500 rpm stirring speed for 15 minutes prior to pouring into cylindrical permanent molds. Prior to mixing SiC<sub>p</sub> was preheated at 1,000 °C for 4 hours, air cooled down to room temperature, and then reheated again at 650 °C for 1 hour. Furthermore additions of magnesium, grain refiner and modifier into the melt were carried out. The composites were investigated via microstructure examination coupled with image analysis, Brinell hardness testing, tensile testing, and fractography by SEM. It was found that addition of 10 wt.% SiC<sub>p</sub> provided uniform distribution of SiC<sub>p</sub> in the matrix with enhanced hardness and tensile properties. However, increasing SiC<sub>p</sub> content up to 15 wt.% led to higher porosity and large SiC<sub>p</sub>-clusters, resulting in density and mechanical property reductions. Fracture surfaces of the tested specimens revealed higher degree of brittle fracture with increasing SiC<sub>p</sub> additions. Gas porosity was observed to be nucleation sites for specimen failures.

School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature\_\_\_\_\_

Advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

อาจารย์ ดร.ฐาปนีย์ พิศุทธิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ทางวิชาการในด้านต่าง ๆ และให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

อาจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล อาจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตติคำทร และคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่เป็นผู้ให้ความรู้เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยในครั้งนี้

นางเอมอร ก่อเกียรติสกุล เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานกับหน่วยงานภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย เป็นอย่างยิ่งตลอดการวิจัยในครั้งนี้

นายวิชาญ วีระชัยสุนทร ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านการใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ นายคมสัน ภายเดช ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านการทำแบบหล่อ และกลึงชิ้นงาน

นายจิรวัดน์ ด้านทองกลาง นายคัมภีร์ ศิริคะเนรัตน์ นายณรงค์ เขียวสูงเนิน นายมานพ จันท์สนธิ นายสมเกียรติ อธิภาพ นายสงคราม ยาวะประภาส นายสังเวียน แจมเกษม นายสหัชชัย ทิพยเนตร์ นายนพพร แถวเพชร นางสาวญาณิศา เขตสระน้อย นายอนุชิต เรืองวิทยานนท์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์และให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานตลอดการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ทุนวิทยานิพนธ์บัณฑิตศึกษา เพื่อเป็นงบประมาณสนับสนุนในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

รุ่งอรุณ บุญถ่าน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ทฤษฎีเบื้องต้น</b> .....	<b>4</b>
2.1 วัสดุเชิงประกอบ.....	4
2.2 อะลูมิเนียม.....	6
2.3 ซิลิคอนคาร์ไบด์.....	8
2.4 วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์.....	8
2.5 การปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ.....	10
2.6 ปริมาณและการกระจายตัวของ ซิลิคอนคาร์ไบด์บน โลหะพื้นอะลูมิเนียม.....	14
2.7 การเกิดสารประกอบเชิงโลหะบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่าง ซิลิคอนคาร์ไบด์กับอะลูมิเนียม.....	18
2.8 กลไกการเพิ่มความแข็งแรง.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 จุดบกพร่องในกระบวนการแข็งตัว.....	27
2.10 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
<b>3 วัสดุและวิธีการทดลอง.....</b>	<b>47</b>
3.1 บทนำ.....	47
3.2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	50
3.3 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้าง จุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	56
3.4 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	66
<b>4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>72</b>
4.1 ผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติ เชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	71
4.2 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อลักษณะ โครงสร้าง จุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	86
4.3 ผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วย กรรมวิธีทางความร้อน (T6) ต่อ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	88
4.4 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติความหนาแน่น ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	91
4.5 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติความแข็งของวัสดุ เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	93



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6	ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติแรงดึงของวัสดุ เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	94
4.7	ผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วย กรรมวิธีทางความร้อน (T6) ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	97
4.8	การวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบแรงดึง.....	101
4.9	การอภิปรายผล.....	106
5	สรุปผลการวิจัย.....	115
	รายการอ้างอิง.....	116
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	120
	ประวัติผู้วิจัย.....	131

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงคุณสมบัติของอะลูมิเนียม	7
2.2	แสดงส่วนผสมและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 356	7
2.3	แสดงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 356	8
2.4	แสดงสมบัติเชิงกลของซิลิคอนคาร์ไบด์	8
2.5	แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ความความเร็วในการกวนผสมแตกต่างกัน	34
2.6	แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ ใช้ความเร็วในการกวนผสม 500 รอบต่อนาที และให้ความร้อนแก่ซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนเทลงแบบหล่อที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	34
2.7	แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์	39
3.1	แสดงผลการทดลองหาความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม	55
3.2	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ใช้ในการวิจัย	57
3.3	แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ	58
3.4	แสดงเงื่อนไขการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์	66
3.5	แสดงค่าความหนาแน่นของธาตุผสมที่ใช้ในการทดลอง	69
3.6	แสดงน้ำหนักและปริมาตรของส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	70
3.7	แสดงความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบ สัดส่วนโดยปริมาตรของ SiC <sub>p</sub> และเฟสพื้นในวัสดุเชิงประกอบแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	70
3.8	แสดงปริมาตรรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากวิธีการคำนวณ	71

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงรูปแบบของวัสดุเสริมแรง.....	5
2.2	แสดงประเภทของวัสดุเชิงประกอบ.....	6
2.3	แสดงช่วงซีลิกอนที่ผสมใน อะลูมิเนียม-ซีลิกอน ที่เหมาะสมกับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยวิธีต่าง ๆ.....	12
2.4	แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และเวลาในกระบวนการตกตะกอน เพื่อเพิ่มความแข็ง.....	13
2.5	แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรง และเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง.....	14
2.6	แสดงการระบุค่ามุมลิ่มผีเสื้อ ( $\square \theta$ ) ของพลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลวซึ่งเป็นเทอมที่บ่งบอกสมบัติในการเปียก.....	16
2.7	แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านขอบเกรน.....	19
2.8	แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่สองที่ตกตะกอนจากการบ่มแข็ง ก) เริ่มเกิดการตกตะกอนของอนุภาค ข) เฟสที่ตกตะกอนยังเป็น Coherency ค) เฟสที่ตกตะกอนเป็น Incoherence.....	20
2.9	แสดงผลกระทบจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแข็งต่อความแข็งแรงและความเหนียว.....	21
2.10	แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่าน GP Zone แบบตัดผ่าน.....	23
2.11	แสดงการโอบของดิสโลเคชันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเฟสที่ตกตะกอน.....	23
2.12	แสดงการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเมื่อขนาดของเฟสที่ตกตะกอนเพิ่มขึ้น.....	24
2.13	แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านอุปสรรค.....	26
2.14	แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านอุปสรรค ก) อนุภาคแข็ง ข) อนุภาคอ่อน.....	26
2.15	แสดงลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแข็งตัว.....	28
2.16	แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการเย็นตัวของอะลูมิเนียมเกรด A356.....	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.17	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์ กวณผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาทีและใช้เวลาใน การกวนผสมคือ ก) 5 นาที ข) 10 นาที ค) 15 นาที.....	32
2.18	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์ กวณผสมด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีและใช้เวลาใน การกวนผสมคือ ก) 5 นาที ข) 10 นาที ค) 15 นาที.....	32
2.19	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์ กวณผสมด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาที และใช้เวลาใน การกวนผสมคือ ก) 5 นาที ข) 10 นาที ค) 15 นาที.....	32
2.20	แสดงสมบัติความแข็งตามตำแหน่งของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ความเร็ว และเวลาในการกวนผสมแตกต่างกัน.....	33
2.21	แสดงผลการทดสอบสมบัติความแข็ง.....	35
2.22	แสดงผลการทดสอบสมบัติแรงดึง.....	35
2.23	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบพื้น อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์.....	36
2.24	แสดงผลการทดสอบสมบัติความแข็ง.....	37
2.25	แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ.....	37
2.26	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์.....	38
2.27	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 200 เท่า ของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ก) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ข) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค) 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	39
2.28	แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ.....	40
2.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ กับปริมาณของสตรอนเทียม.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.30	แสดงผลการทดสอบแรงดึง
	ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดกับปริมาณของ Sr
	ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง ณ จุดครากกับปริมาณของ Sr..... 42
2.31	ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เติม Sr 0.03 เปอร์เซนต์ และไม่เติม Sr โดยน้ำหนัก
	ก) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ข) ค่าอัตราส่วนการยืดตัว..... 43
2.32	แสดงผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วย SiC เติม Sr 0.03 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักและไม่เติม Sr
	ก) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ข) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว..... 43
2.33	แสดงผลการการทดลอง ก) Dendritic arm spacing: DAS และ ข) ความหนาแน่นของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค..... 45
3.1	แสดงขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้าง จุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก..... 48
3.2	แสดงขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก..... 49
3.3	แสดงเตาหลอมน้ำโลหะที่ให้ความร้อนด้วยลวดความต้านทาน (Resistance Furnace)..... 51
3.4	แสดงตู้ควบคุมกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนแก่เตาหลอม..... 51
3.5	ก) แสดงชุดควบคุมความเร็วในการกวนผสม ข) มอเตอร์ไฟฟ้า..... 52
3.6	แสดงแบบใบพัดที่ใช้กวนผสม..... 52
3.7	แสดงการประกอบอุปกรณ์ในการหลอมโลหะและอุปกรณ์ในการกวนผสม..... 53
3.8	แสดงเบ้าหลอมโลหะ..... 54
3.9	แสดงแบบหล่อถาวร..... 54
3.10	แสดงการกวนผสมที่ทดลองปั่นในน้ำเชื่อม..... 55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่วัดได้และความเร็วที่อ่านได้จากหน้าจาดชุดควบคุม.....56
3.12	แสดงสารลดขนาดเกรน (Al-5Ti-B) สารปรับรูปทรงพื้นฐานยูเทคติกซิลิคอน (Al-10Sr) และแมกนีเซียม (Mg).....58
3.13	แสดงการนำอะลูมิเนียมใส่ลงในเป่าหลอมโลหะ.....59
3.14	แสดงขั้นตอนการเติม Sr Al-5Ti-B และ Mg ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม.....60
3.15	แสดงขั้นตอนการเติม SiC <sub>p</sub> ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม.....60
3.16	แสดงการกวนเพื่อผสมซิลิคอนคาร์ไบด์กับน้ำโลหะอะลูมิเนียมก่อนเทลงแบบหล่อ.....61
3.17	แสดงขั้นตอนการเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อถาวร.....61
3.18	แสดงการติดตั้งชุดเครื่องมือวัดความหนาแน่นด้วยการแทนที่ด้วยน้ำ.....63
3.19	ส่วนของชิ้นงานหล่อที่นำไปหาความหนาแน่น.....63
3.20	แสดงตำแหน่งของชิ้นงานหล่อที่นำไปทดสอบความแข็งแบบบริเนลและวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค.....64
3.21	แสดงแบบขึ้นทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM B557M-02a.....65
3.22	แสดงแผนภาพเวลาที่ใช้ในการทำ T6 Heat Treatment.....67
4.1	แสดงส่วนประกอบบนโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม.....73
4.2	แสดงการแยกตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จากวัสดุเชิงประกอบ.....73
4.3	โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....76
4.4	โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักร่วมกับ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ..... 78
4.6	โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักร่วมกับ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ..... 79
4.7	ผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม ที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ได้รับ ผลกระทบจากการเติมธาตุผสม ..... 81
4.8	แสดงความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผล กระทบจากการเติมธาตุผสม ..... 82
4.9	แสดงผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนล ของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม ..... 83
4.10	กราฟแสดงความเค้นความเครียดของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม ..... 84
4.11	แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม ..... 84
4.12	แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยปริมาณ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ..... 87
4.13	การวิเคราะห์ปริมาณเฟสของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยปริมาณ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ..... 88

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	แสดงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วย กรรมวิธีทางความร้อน .....	90
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ กับปริมาณ ของซิลิคอนคาร์ไบด์ .....	92
4.16	แสดงการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนและช่องว่างทางทฤษฎีของวัสดุ เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	93
4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ กับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ .....	94
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเค้นความเครียดของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยปริมาณ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	95
4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าโมดูลัส ความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ .....	96
4.20	แสดงผลกระทบต่อสมบัติความแข็งแรงจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) .....	98
4.21	แสดงผลกระทบต่อสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดจากการปรับปรุง สมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) .....	98
4.22	ความสัมพันธ์ของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณรูพรุน กับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ .....	99
4.23	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้น-ความเครียด ของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ได้รับผลกระทบ จากกรรมวิธีทางความร้อน (T6) .....	100



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.24	แสดงพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบแรงดึงที่แตกต่างกันเนื่อง จากปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอน แบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า.....	102
4.25	แสดงพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียม เกรด 356.....	103
4.26	แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	104
4.27	แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	105
4.28	เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบและค่าทางทฤษฎี.....	111
4.29	เปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบและค่าทางทฤษฎี.....	113
4.30	เปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบและ ค่าทางทฤษฎี.....	114

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BHN	=	Brinell Hardness Number
$\alpha$ -Phase	=	Primary Aluminium
$\beta$ -Phase	=	Primary Silicon
kN	=	Kilo Newton
$\rho$	=	Density
MMCs	=	Metal Matrix Composite
$\text{SiC}_p$	=	Silicon Carbide Particulates
UTS	=	Ultimate Tensile Strength
kN	=	Kilonewton
Mpa	=	Megapascal
E	=	Elastic Modulus



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะผสมอะลูมิเนียมมีบทบาทสำคัญต่อการใช้งานทางวิศวกรรมมากขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อให้การใช้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงมีการศึกษา วิจัยและพัฒนาสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานและขยายขอบเขตการใช้งานของอะลูมิเนียมทดแทนวัสดุอื่นเพื่อลดน้ำหนักของชิ้นงาน ในปัจจุบันมีการปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมในรูปแบบของ “วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)” โดยการนำวัสดุตั้งแต่สองชนิดมาผสมกัน ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะไม่ใช่เนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสที่กระจาย หรือ ตัวเสริมแรง (Reinforcement) (กิตติพงษ์, กิมะพงษ์, ศิริชัย, ต่อสกุล, อนินท์, มีมนต์ และ นรพร กลั่นประชา, 2553) สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จะขึ้นกับสมบัติและปริมาณของวัสดุที่นำมาผสมกัน รวมทั้งรูปทรงทางเรขาคณิตและการกระจายของเฟสที่เสริมแรง (Abedi and Emamy, 2010)

วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นการนำซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงมาเสริมความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะที่มีข้อด้อยในเรื่องความแข็งแรง การผลิตโลหะประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวิธีการที่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อได้ แต่อย่างไรก็ดี ในขั้นตอนการผลิตเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีก็ยังคงเป็นประเด็นที่ต้องมีการศึกษาค้นคว้าวิจัย เนื่องจาก การที่จะทำให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในอะลูมิเนียมที่มีขนาดเกรนเล็กละเอียด จะทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยงานหล่อมีสสมบัติเชิงกลที่ดี แต่การที่นำอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มาเติมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมเพื่อให้เกิดการผสมกันนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจากมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของวัสดุทั้งสองชนิด (อะลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และซิลิคอนคาร์ไบด์มีความหนาแน่น 3.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) การใช้ใบพัดในการกวนผสมเพื่อช่วยให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวในน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้ด้นั้นขึ้นอยู่กับความเร็วรอบลักษณะของใบพัดและเวลาในการกวนผสม (Balasivanandha Prabu, Karunamoorthy, Kathiresan, and Mohanb, 2006) นอกจากนี้ปัญหาในเรื่องของความสามารถในการเปียก (Wettability)

ระหว่างซิลิคอนคาร์ไบด์กับอะลูมิเนียมเป็นอีกข้อจำกัดหนึ่ง ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณและลักษณะการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงในโครงสร้างจุลภาค อีกทั้งในขั้นตอนของการผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ลงในอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลวนั้น ยังสามารถเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ ( $Al_4C_3$ ) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และโลหะพื้นอะลูมิเนียม ซึ่งสารประกอบ  $Al_4C_3$  ดังกล่าวมีความเปราะสูงและส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลเสียต่อความเหนียว (Ductile) และความแกร่ง (Toughness) (Hashim, Looney and Hashmi, 2001)

ในรอบกว่า 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษา วิจัยเพื่อหาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยการกวนผสม ซึ่งจากงานวิจัยบางส่วนได้รายงานถึงปริมาณที่เหมาะสมของซิลิคอนคาร์ไบด์เท่านั้นที่จะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) สูงที่สุด แต่งานวิจัยบางส่วนก็แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ในวัสดุเชิงประกอบ จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความไม่สอดคล้องของผลการทดลอง และเนื่องจากมีข้อมูลบางส่วนของงานวิจัยที่มีข้อจำกัดในการเผยแพร่ซึ่งเป็นผลมาจากความลับทางการค้า จึงเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นการศึกษาผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลในการวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ เพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล เพื่อให้เกิดการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถขยายขอบเขตในการใช้งานด้านวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ได้มากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ผลิตด้วยวิธีการกวนผสม เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุโลหะที่มีความเหนียวสูง แต่มีความแข็งแรงต่ำ ให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ด้วยการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกส์ที่มีความแข็งแรงสูง โดยสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณและสมบัติเดิมของอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งจากกลไกของการผสม การเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในวัสดุเชิงประกอบจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 เป็นการศึกษาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เสริมแรงจำหน่ายโดยบริษัท เอส.เอ็ม.เคมีคอลซัพพลาย จำกัด มีขนาดเล็กกว่า 37 ไมโครเมตร ที่มีขนาดเฉลี่ย 10.5 ไมโครเมตร จำนวนไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

1.4.2 การปรับปรุงเฟสพื้นของอะลูมิเนียมโดยใช้ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นสารลดขนาดเกรน ส่วนการปรับปรุงรูปร่างของยูเทคติกซิลิคอนให้มีลักษณะโค้งมนด้วยการใช้ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการเพิ่มความสามารถในการเปื่อยระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กับน้ำโลหะอะลูมิเนียมโดยการแมกนีเซียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.4.3 การกวนผสมน้ำโลหะด้วยใบพัดชนิด 45° Flat blade disk turbine โดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ณ อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 650 องศาเซลเซียส พร้อมกับกวนผสมด้วยความเร็วคงที่ เป็นเวลา 10 นาที ก่อนเทลงแบบหล่อถาวร

1.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบสมบัติความแข็งและสมบัติแรงดึง โดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบบริเนล และการทดสอบสมบัติแรงดึง โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 250 กิโลนิวตัน เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสมให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ จะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการเติมธาตุผสม และปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ และจะเป็นฐานข้อมูลที่สำคัญในการขยายขอบเขตการใช้งานด้านวิศวกรรม ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1 วัสดุเชิงประกอบ (Composites)

วัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่เกิดการนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิด (เฟสหรือส่วนประกอบ) มาผสมกันเป็นของใหม่ โดยวัสดุที่นำมาผสมกันนี้ จะมีความแตกต่างกันทั้งในด้านรูปแบบ องค์ประกอบทางเคมี และที่สำคัญต้องไม่เป็นตัวทำลายของซึ่งกันและกัน สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบจะเกิดจากสมบัติเดิมและสัดส่วนของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบในวัสดุเชิงประกอบ แต่ละส่วน ซึ่งมักจะมีสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งดีเด่นมากกว่ากัน ดังนั้นเมื่อนำมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ จะได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีของส่วนประกอบของวัสดุตั้งต้นรวมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบ นั้น (แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา และ ธรรมนุญ อุคมนัน, ม.ม.ป.) โดยจุดประสงค์หลักในการสร้างวัสดุเชิงประกอบ คือ ความต้องการที่จะรวมสมบัติที่ดีของวัสดุสองชนิดเข้าไว้ด้วยกันซึ่งไม่สามารถหาได้จากวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น ด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรง น้ำหนักเบา สมบัติการนำไฟฟ้า โดยจุดเด่นของวัสดุเชิงประกอบ คือ การนำวัสดุที่แตกต่างกัน มาผสมกันแล้วก่อให้เกิดสมบัติที่ไม่สามารถได้รับจากวัสดุเริ่มต้น ตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ เปลือกหอยเป่าอ้อย ไม้ และกระดูก (กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนินท์ มีมนต์ และ นรพร กลั่นประชา, 2553) เป็นต้น

##### 2.1.1 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ คือ

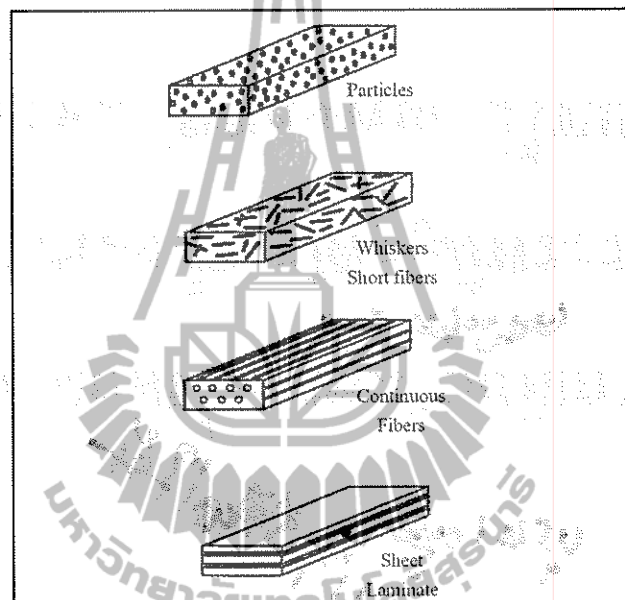
ส่วนประกอบที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบนั้น จะมาจากวัสดุตั้งต้นที่นำมาผสมกันและจะมีส่วนประกอบที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตวัสดุเชิงประกอบ โดยมี 3 ส่วนประกอบด้วยกันคือ

1. วัสดุเนื้อหลัก (Matrix) คือ วัสดุที่มีปริมาณมากในวัสดุเชิงประกอบ มีหน้าที่ห่อหุ้มหรือยึดจับวัสดุเสริมแรงให้ฝังตัวอยู่ได้และมักมีสมบัติที่ด้อยกว่าวัสดุเสริมแรง

2. วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) คือ วัสดุที่มีสมบัติต่างจากวัสดุเนื้อหลักและมีสมบัติที่ดีกว่า ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเนื้อหลักมีสมบัติที่ดีขึ้นได้ โดยจะอยู่ในลักษณะกระจายตัวอยู่หรือฝังตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก วัสดุเสริมแรงมีหลายรูปแบบได้แก่ อนุภาค (Particles) เส้นใยแบบสั้น (Short fibers) เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง (Continuous fibers) แบบแผ่น (Sheet laminate) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

3. อंतरภาค (Interface) คือ พื้นที่รอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้า 2 ผิวหน้า หรือระหว่าง 2 วัสดุภาค เช่นของแข็ง-ของแข็ง หรือ ของเหลว-ของแข็ง (จูติรัตน์ ธีระพรกุล, 2548) อंतरภาคที่

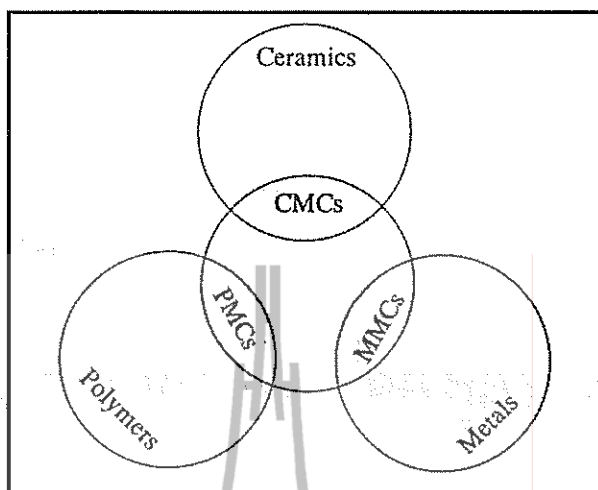
เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบนี้ มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่มีพื้นที่มากและเป็นรอยต่อที่มีความแตกต่างทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุเนื้อพื้นและวัสดุเสริมแรงจะมีค่าทางอุณหพลศาสตร์ที่ไม่สมดุลกันเนื่องจากเป็นวัสดุคนละชนิดจึงจะมีความแตกต่างของสมบัติ เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนไม่เท่ากัน จำนวนและขนาดของอะตอมที่ต่างกัน โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันความหนาแน่นที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของวัสดุเสริมแรง (Chawla, 2003)

### 2.1.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุที่นำมาเป็นส่วนประกอบในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ จะมีทั้ง โลหะ พอลิเมอร์ และเซรามิก โดยอาจจะนำมาใช้ในส่วนของวัสดุพื้นหรือวัสดุเสริมแรง ในวัสดุเชิงประกอบก็ได้ ส่วนการจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบซึ่งแบ่งตามประเภทของวัสดุพื้นได้แสดงในรูปที่ 2.2 โดยจำแนกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะ (Metal Matrix Composites; MMCs) วัสดุเชิงประกอบพื้นเซรามิก (Ceramic Matrix Composites; CMCs) และวัสดุเชิงประกอบพื้นพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites; PMCs)



รูปที่ 2.2 แสดงประเภทของวัสดุเชิงประกอบ (Chawla, 1993)

## 2.2 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมผสมมีบทบาทมากในอุตสาหกรรมการหล่อ เพราะนอกจากจะมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักสูง มีจุดหลอมเหลวต่ำ (สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, 2548) อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีสมบัติทางด้านการหล่อหลอมดี มีความสามารถในการไหลตัวดี ทำให้สามารถหล่อเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนได้ง่าย แต่ข้อจำกัดของอะลูมิเนียมคือการมีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic limit) ต่ำ (มนัส สติรจินดา, 2536) การขึ้นรูปอะลูมิเนียมด้วยการหล่อนั้นสามารถใช้เทคนิคได้หลายวิธี เช่น การหล่อด้วยแบบทราย หล่อด้วยแบบหล่อถาวร และหล่อด้วยแบบหล่อโลหะโดยใช้แรงอัด สมบัติของอะลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 2.1

อะลูมิเนียมผสมแบ่งกลุ่มใช้งานเป็น 2 กลุ่มคือ อะลูมิเนียมผสมรีด (Wrought alloy) และอะลูมิเนียมหล่อ (Casting alloy) สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อนั้นมักจะเป็นโลหะอะลูมิเนียมผสมด้วยซิลิกอนซึ่งต้องมีปริมาณซิลิกอนที่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยายูเทคติก นอกจากนั้นซิลิกอนยังทำให้โลหะผสมมีจุดหลอมเหลวต่ำลง มีความสามารถในการไหลตัวดี และทำให้ความสามารถในการหล่อขึ้นรูป (Castability) ดี การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ด้วยการเติมโบรอนหรือไทเทเนียมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วยการลดขนาดเกรนของอะลูมิเนียมปฐมภูมิ การเติมโซเดียม หรือสตรอนเทียมเพื่อปรับโครงสร้างยูเทคติกให้ละเอียด ส่วนการเติมฟอสฟอรัสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของซิลิกอนโดยการลดขนาดเกรนของซิลิกอนปฐมภูมิ นอกจากนั้นยังเติมแมกนีเซียม ทองแดง หรือสังกะสีเพื่อช่วยให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการบ่มแข็ง และการเพิ่มธาตุบางอย่าง เช่น นิกเกิล โครเมียม และแมงกานีส ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการทำให้



เป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution Hardening) และยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Strength) เป็นต้น (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์และคณะ, 2553)

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของอะลูมิเนียม (ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยาและสาโรช จูติเกียรติพงษ์, 2541)

คุณสมบัติของอะลูมิเนียม	มีค่า
หมายเลขอะตอม (atomic number)	13
น้ำหนักอะตอม (atomic weight) (g/mole)	26.97
วาเลนซ์	3
โครงสร้างของผลึก	FCC
ความหนาแน่นที่ 20 (g/cm <sup>3</sup> )	2.6989
จุดหลอมเหลว (°C)	660.2
จุดเดือด (°C)	2450
การหดตัวขณะแข็งตัว (Solidification Shrinkage) (%)	6.6
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (cal/g)	94.5
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (cal/g)	2260
ความร้อนจำเพาะที่ 100 °C (cal/g)	0.224

### 2.2.1 อะลูมิเนียม 356

อะลูมิเนียมเกรด 356 เป็นอะลูมิเนียมในกลุ่ม อะลูมิเนียม-ซิลิกอน มีสมบัติของการหล่อที่ดี (Castability) ทนทานต่อการกัดกร่อนสามารถนำไปจนถึงตัดหรือเชื่อมได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานอะลูมิเนียมซิลิกอนผสมเป็นหลัก มากถึง 85-90 เปอร์เซ็นต์ของอะลูมิเนียมประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (เซวาลิต ถิมมณีวิจิตร, ม.ม.ป.) โดยส่วนผสมตามมาตรฐานของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ผลิตเพื่อการค้าแสดงในตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 356 (American Foundry Society Des Plaines, 2001)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Other Elements	
							Each	Total
6.5-7.5	0.60	0.25	0.35	0.20-0.45	0.35	0.25	0.05	0.15

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 356 (MRT Casting, www, 2011)

Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, V	Strength, $\sigma$ (GPa)	Failure strain, $\epsilon$ (%)	Thermal expansivity (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
60	71	0.33	0.16-0.2	3	24	130-230

### 2.3 ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)

ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง แม้ว่าซิลิคอนคาร์ไบด์จะไม่ใช้สารประกอบออกไซด์ แต่สามารถทำให้เกิดซิลิคอนออกไซด์ที่ผิวของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้โดยให้การความร้อนแก่ซิลิคอนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ชั้นสารประกอบซิลิคอนออกไซด์จะสามารถใช้ปกป้องตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ สมบัติเชิงกลของซิลิคอนคาร์ไบด์แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติเชิงกลของซิลิคอนคาร์ไบด์ (Accuratus Ceramic Corporation, www, 2010)

Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, V	Strength, $\sigma$ (GPa)	Failure strain, $\epsilon$ (%)	Thermal expansivity (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
2800	410	0.17	3.9	1.2	4.0	100

### 2.4 วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จัดเป็นวัสดุชนิดใหม่มีสมบัติเชิงกลแบบไอโซโทรปิก (Isotropic properties) เกิดจากการที่ผงอนุภาคซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอบนวัสดุพื้น (กิตติพงษ์ กิมะพงษ์และคณะ, 2553) การพัฒนาวัสดุในรูปแบบของวัสดุเชิงประกอบนั้นเพื่อนำมาใช้ในงานทางด้านอากาศยาน แต่ก็มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมชนิดอื่น เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะที่มีความเหนียวสูงแต่มีความแข็งแรงไม่สูงมากนัก ด้วยการเสริมแรงด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง โดยสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์นั้น จะขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลและสัดส่วนโดยปริมาตรของอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งสามารถทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบได้จากกฎการผสม (Rule of mixtures) ดังสมการที่ 2.1-2.3 โดยสมการที่ 2.1 สำหรับทำนายค่า

โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) สมการที่ 2.2 สำหรับทำนายค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (แม้น อมรสิทธิ์และคณะ, ม.ม.ป.) และสมการที่ 2.3 สำหรับทำนายสมบัติความแข็ง (Kim, 2000)

$$E_c = E_a V_a + E_s V_s \quad (2.1)$$

$$\sigma_c = \sigma_a V_a + \sigma_s V_s \quad (2.2)$$

$$H_c = H_a V_a + H_s V_s \quad (2.3)$$

โดยที่	$E_c$	หมายถึง	โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบ
	$E_a$	หมายถึง	โมดูลัสความยืดหยุ่นของอะลูมิเนียม
	$E_s$	หมายถึง	โมดูลัสความยืดหยุ่นของซิลิคอนคาร์ไบด์
	$\sigma_c$	หมายถึง	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ
	$\sigma_a$	หมายถึง	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของอะลูมิเนียม
	$\sigma_s$	หมายถึง	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของซิลิคอนคาร์ไบด์
	$H_c$	หมายถึง	ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ
	$H_a$	หมายถึง	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียม
	$H_s$	หมายถึง	ค่าความแข็งของซิลิคอนคาร์ไบด์
	$V_a$	หมายถึง	สัดส่วนโดยปริมาตรของอะลูมิเนียม
	$V_s$	หมายถึง	สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิคอนคาร์ไบด์

นอกจากสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จะขึ้นกับสมบัติและปริมาณของวัสดุที่นำมาผสมกันและรูปร่างทางเรขาคณิตแล้ว ลักษณะการกระจายของเฟสที่เสริมแรงก็มีความสำคัญด้วยเช่นกัน มีรายงานการวิจัยที่ผ่านมาแสดงถึงผลกระทบของรูปร่าง การกระจายตัวและปริมาณสัมพัทธ์ของซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ นอกจากนั้น โครงสร้างทางจุลภาค เช่น ขนาดของเกรน และการเกิดสารประกอบเชิงโลหะล้วนมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ (Villegas, Sierra, Lucas, Fern'andez and Caballero, 2007) การผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสมให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีต้องพิจารณาถึง 3 ส่วนประกอบหลักในวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม ปริมาณและลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ บนโลหะพื้นอะลูมิเนียม และประเด็นสุดท้าย คือการเกิดสารประกอบเชิงโลหะบริเวณอัตรภาค ระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์

## 2.5 การปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ

การปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อนั้นทำได้โดยปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะแบ่งเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างด้วยการเติมสารเติมแต่ง (Additions) ก่อนเทลงในแบบหล่อ และการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูป ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยจะกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.5.1 การปรับปรุงโครงสร้างด้วยการเติมสารเติมแต่งก่อนเทลงในแบบหล่อ

สำหรับการปรับปรุงอะลูมิเนียมก่อนเทลงในแบบหล่อนั้นเป็นการควบคุมโครงสร้างทางโลหะวิทยา ของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน โดยการเติมธาตุผสมต่าง ๆ เพื่อให้มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนให้มีความเหมาะสมกับปริมาณของซิลิกอนที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียม สำหรับเทคนิคที่ใช้ แบ่งเป็น 3 วิธี ได้แก่

1. การปรับลดขนาดเกรนอะลูมิเนียมปฐมภูมิให้มีขนาดเล็ก
2. การปรับปรุงรูปร่างของยูเทคติกซิลิกอนให้มีลักษณะโค้งมนและมีขนาดเล็ก
3. การปรับซิลิกอนปฐมภูมิให้มีขนาดเล็ก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน มีความเหมาะสมกับเทคนิคการเติมธาตุผสมเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกัน โดยช่วงที่เหมาะสมกับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยการทำเกรนให้เล็กละเอียด การปรับปรุงรูปร่างของยูเทคติกซิลิกอนให้มีลักษณะโค้งมนและมีขนาดเล็ก และโดยการปรับซิลิกอนปฐมภูมิให้มีขนาดเล็ก (Primary Silicon;  $\beta$ -Phase) จะขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิกอนที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 2.3

#### 2.5.1.1 การลดขนาดเกรนของอะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Grain Refinement)

ในกรณีที่อะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่ใช้ในกระบวนการหล่อที่เป็นส่วนผสมไฮโปยูเทคติก เมื่อเกิดการแข็งตัวหลังจากที่น้ำโลหะไหลเข้าไปในแบบหล่อจะเกิดโครงสร้างของอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ( $\alpha$ -aluminum) โดยในขณะที่แข็งตัวนั้นเกรนก็จะเกิดการเติบโตขึ้นจากจุดกำเนิดและขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนโตติดกับเกรนอื่นหรือแบบหล่อ การที่อะลูมิเนียมมีเกรนขนาดที่สม่ำเสมอและเล็กละเอียดจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุดเพื่อให้ได้เกรนที่ละเอียด คือ การลดขนาดเกรนให้ละเอียด (Grain Refinement) โดยการเติม Al-5Ti-1B หรือ Al-3Ti-1B ในขณะที่อะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อให้เกิดอนุภาคของ  $TiAl_3$  และ  $TiB_2$  กระจายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเกรนที่เป็นอนุภาคต่างชนิดกัน (Heterogeneous Nucleation) ซึ่งทำให้อะลูมิเนียมปฐมภูมิมิขนาดเกรนที่เล็กละเอียด การมีอนุภาค  $TiAl_3$  และ  $TiB_2$  กระจายตัวในอะลูมิเนียมหลอมเหลวในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ได้อะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ถ้าหากมีการเติม Al-5Ti-1B หรือ Al-3Ti-1B ในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดอนุภาค  $TiAl_3$  และ  $TiB_2$  มากเกินไปและจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งจะเปรียบเสมือนเป็นการ

เติมสิ่งปนเปื้อนที่แข็งลงไปใอะลูมิเนียมหลอมเหลวและก่อให้เกิดปัญหาด้านอื่นแทน เช่น คุณภาพผิวที่ได้จากการกัดที่ต่ำ แต่หากมีอนุภาคในการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดที่น้อยเกินไปก็อาจทำให้ขนาดเกรนที่ได้หยาบ และอาจเกิดปัญหาในกระบวนการผลิตอื่น ๆ ตามมา เช่น ความสามารถในการไหลตัว (Fluidity) ลดลง การกระจายตัวของรูพรุนไม่เหมาะสมทำให้มีโอกาสเกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ในงานหล่อ

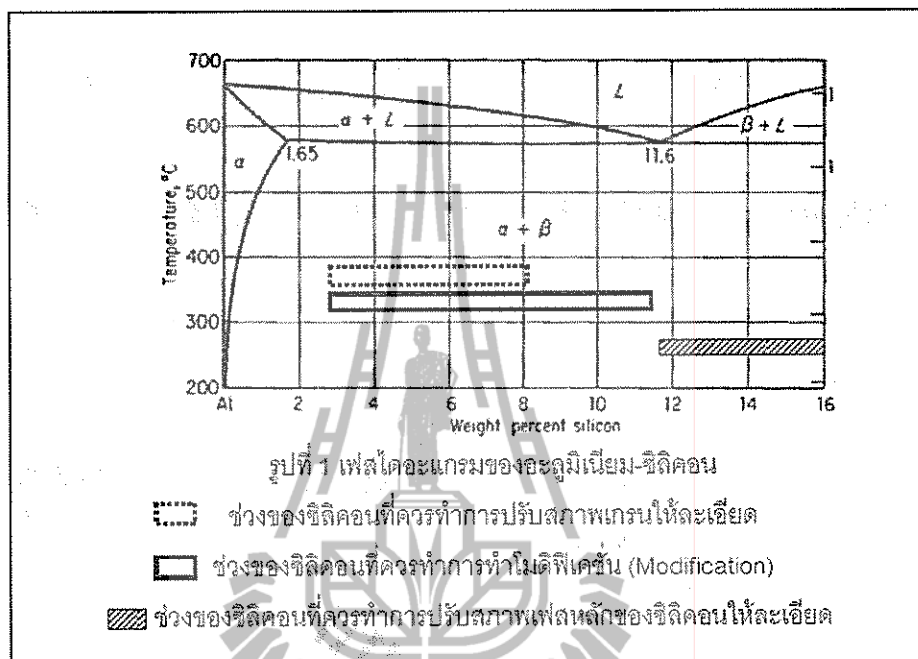
2.5.1.2 การปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของเฟสยูเทคติกซิลิคอนให้มีลักษณะโค้งมน และมีขนาดเล็ก (Modification)

การปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของเฟสยูเทคติกซิลิคอนให้มีลักษณะโค้งมน และมีขนาดเล็ก หรือเรียกว่าการทำโมดิฟิเคชัน หมายถึงการปรับโครงสร้างและการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนให้มีขนาดที่เล็กละเอียด และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมักใช้กับกรณีของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีปริมาณของซิลิคอนอยู่ในช่วงที่เป็นเกรดไฮโปยูเทคติกเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือความเหนียว (Ductility) ที่จะเพิ่มขึ้น การทำโมดิฟิเคชันสามารถทำได้โดยการเติมโซเดียม (Na) หรือสตรอนเทียม (Sr) ซึ่งการเติมสตรอนเทียมลงไปใอะลูมิเนียมหลอมเหลว นั้น มักเติมในรูปแบบของโลหะผสมของอะลูมิเนียม-10 เปอร์เซนต์ สตรอนเทียม (Al-10%Sr) เนื่องจากสตรอนเทียมมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในอากาศที่รุนแรง (เซวาลิต ลิมมณีวิจิตร, สาธิต จันทนปุ่น, ประมวล ภูลม้อย และไชยยุทธ โพธิ์เจริญ, 2546) การใช้สตรอนเทียมจะมีประสิทธิภาพต่ำหากอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อต่ำ เช่นในกรณีของการหล่อในแบบหล่อทราย นอกจากนั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียสตรอนเทียมไม่ควรใช้ก๊าซคลอรีน หรือฟลักซ์ที่ทำให้เกิดก๊าซคลอรีนในการกำจัดไฮโดรเจน ทั้งนี้เพราะอาจทำให้เกิดการสูญเสียสตรอนเทียมในปริมาณมากได้

2.5.1.3 การปรับซิลิคอนปฐมภูมิ ให้มีขนาดเล็กละเอียด

ในกรณีการปรับสภาพของซิลิคอนปฐมภูมิ ( $\beta$ -Silicon) ที่อยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติกให้ละเอียดขึ้น สามารถทำได้โดยการเติมโลหะผสมหลักอะลูมิเนียม-ฟอสฟอรัส ทั้งนี้หากไม่มีการปรับสภาพของเฟสซิลิคอนปฐมภูมิ ซึ่งนอกเหนือจากปัญหาการยึดตัวและความเหนียวแล้ว อาจทำให้เกิดปัญหาการแยกตัวของเฟสซิลิคอนทำให้ส่วนผสมทางเคมีไม่สม่ำเสมอได้ การเติมฟอสฟอรัสลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้น ทำให้ฟอสฟอรัสทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเป็นอนุภาคของอะลูมิเนียมฟอสไฟด์ (AIP) ที่โครงสร้างระดับอะตอมมีความคล้ายคลึงกับซิลิคอนมาก โดยอนุภาคอะลูมิเนียมฟอสไฟด์นี้จะทำหน้าที่เป็นเมล็ดเทียม (Heterogeneous Nucleation) ซึ่งมีความเหมาะสมมาก ทำให้ได้ขนาดของเฟสซิลิคอนปฐมภูมิละเอียดขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมฟอสฟอรัสลงในอะลูมิเนียมเกรดไฮโปยูเทคติก

เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพการทำโมดิฟิเคชัน โดยการเติม โซเดียมและสตรอนเทียม ลดลง (เขาวลิต ลีम्मณีวิจิตร, ม.ม.ป.)



รูปที่ 2.3 แสดงช่วงซิลิคอนที่ผสมในอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่เหมาะสมกับการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ด้วยวิธีต่าง ๆ (เขาวลิต ลีम्मณีวิจิตร.ม.ม.ป.)

### 2.5.2 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูป

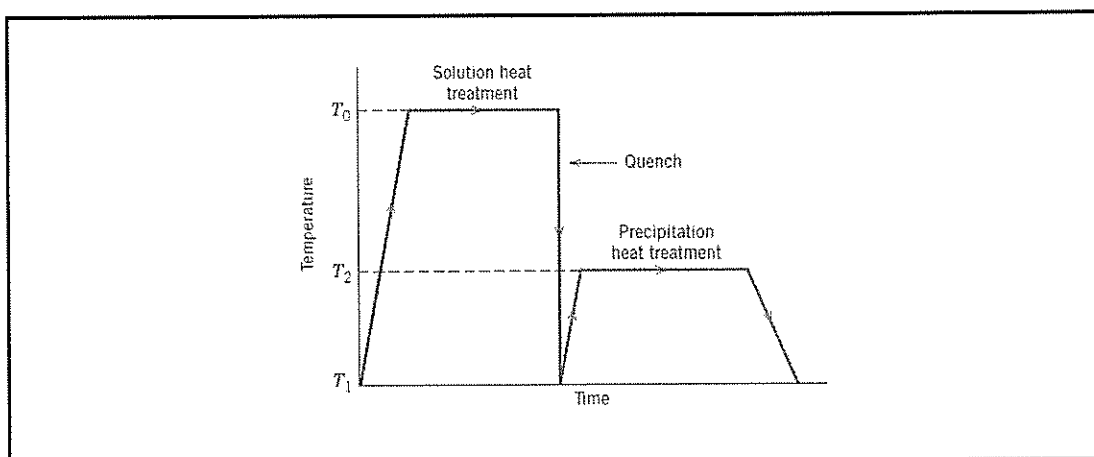
เพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียมภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกระบวนการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Precipitation Strengthening) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้อนุภาคเล็กละเอียดที่มีความแข็งแรง ตกตะกอนและกระจายตัวอย่างหนาแน่นในเนื้อโลหะผสมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน อนุภาคเล็ก ๆ ที่ตกตะกอนเหล่านี้จะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ทำให้โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการนี้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โลหะผสมที่สามารถผ่านกระบวนการ Precipitation Strengthening ได้จะต้องเป็นระบบ Terminal Solid Solution คือ ต้องมีความสามารถในการละลายของธาตุหนึ่งในอีกธาตุหนึ่งลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ขั้นตอนในการทำ Precipitation strengthening มีสามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.4 และมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. การอบละลาย (Solution Heat Treatment) เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการ Precipitation Strengthening ซึ่งบางครั้ง เรียกว่า Solutionizing สำหรับในขั้นตอนนี้เป็นการให้ความ

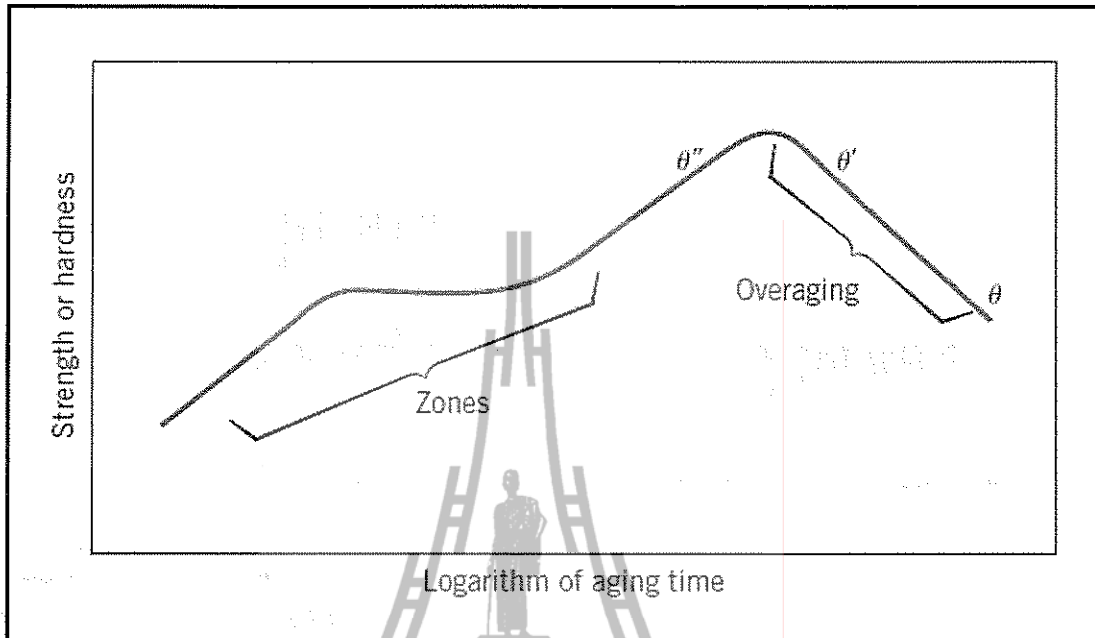
ร้อนกับโลหะผสม ให้อยู่ในช่วงสูงกว่าเส้น โซลิวส (Solvus) แต่ต่ำกว่าเส้น โซลิดัส (Solidus) โดยทิ้งไว้เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้โลหะผสมมีโครงสร้างเป็นเฟสเดียวที่สม่ำเสมอ

2. การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) โดยหลังจากขั้นตอนของการอบละลายตามเวลาที่กำหนดแล้ว จะนำโลหะผสมมาทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid cooling) โดยอาจจุ่มในน้ำอุ่น น้ำเย็น หรือน้ำมัน ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว วิธีการนี้ทำให้เกิดสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด โดยธาตุผสมจะถูกละลายในเนื้อพื้นโลหะมากกว่าสภาวะสมดุล จึงอยู่ในสภาวะกึ่งเสถียร (Metastable) สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วอาจทำให้รูปร่างของชิ้นงานผสมบิดเบี้ยวได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันการบิดเบี้ยว ชิ้นงานอะลูมิเนียมจึงมักทำให้เย็นตัวในน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส (กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และคณะ, 2553)

3. การบ่มแข็ง หรือ เอจิง (Aging) จะกระทำหลังจากทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ในขั้นตอนที่ 2 มาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการแยกตัวของเฟสที่สองซึ่งจะเป็นอนุภาคเล็ก ๆ (Fine particles) ที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป ในเนื้อพื้น ทำให้โลหะผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีแรงกระทำไต่ยากขึ้นหรือมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั่นเอง การบ่มแข็งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นเพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ ถือว่าเป็นวัตถุประสงค์หลักในการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน หากทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า "เอจิงธรรมชาติ (Natural Aging)" หรือ "การบ่มแข็งธรรมชาติ" ส่วนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เรียกว่า "การบ่มแข็งประดิษฐ์ (Artificial Aging)" สำหรับความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนนี้ จะมีความสัมพันธ์กับเวลาในการบ่มแข็ง โลหะผสมจะมีความแข็งแรงสูงสุดเมื่อทิ้งไว้ในระยะเวลาที่เหมาะสม ถ้าทิ้งไว้นานเกินไปจะเกิดภาวะที่เรียกว่า Over Aging ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และเวลาในกระบวนการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (William, Callister and David, 2009)



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรง และเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง (William, et al., 2009)

## 2.6 ปริมาณและการกระจายตัวของ ซิลิคอนคาร์ไบด์บนโลหะพื้นอะลูมิเนียม

ลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์อย่างสม่ำเสมอบนโลหะพื้นอะลูมิเนียมเป็นสิ่งทำได้ค่อนข้างยากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เนื่องจากการนำวัสดุ 2 ชนิดซึ่งมีความแตกต่างกันมาผสมกัน โดยอะลูมิเนียมเป็นโลหะ ส่วนซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นเซรามิก ซึ่งมีข้อจำกัดของความสามารถในการเปียก (Wettability) เป็นผลทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมในอะลูมิเนียมได้น้อย ดังนั้นประเด็นของข้อจำกัดเรื่องสมบัติในการเปียกนั้นจึงต้องถูกนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรก เนื่องจากถ้าหากน้ำโลหะอะลูมิเนียมไม่สามารถเปียกกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จะทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์แยกตัวออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลว และไม่เกิดสถานะเสริมแรง

นอกจากข้อจำกัดของความสามารถในการเปียกแล้ว อะลูมิเนียมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ยังมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ดังนั้นในขั้นตอนการผลิตวัสดุเชิงประกอบจะทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมเกิดการตกตะกอนก่อนที่อะลูมิเนียมจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบมีความแตกต่างกันตามตำแหน่งของชิ้นงาน ซึ่งหากมีการใช้ใบพัดในการกวนผสมจะช่วยให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวได้ดีขึ้น แต่ลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ในวัสดุเชิงประกอบก็จะขึ้นอยู่กับความเร็วและเวลาที่ใช้ในการกวนผสม (Balasivanandha Prabu, Karunamoorthy, Kathiresan, and Mohanb, 2006)



### 2.6.1 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

การผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จะสามารถทำได้ก็ต่อเมื่อทำให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นของแข็งสามารถเปียกกับอะลูมิเนียม ในขณะที่หลอมเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของพื้นผิวอนุภาค (Surface chemistry of particles) และแรงตึงผิว (Surface tension) ของของเหลว ดังนั้นในกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบควรพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติในการเปียก ได้แก่ สมบัติทางเคมีของพื้นผิวอนุภาค แรงตึงผิวของของเหลว สิ่งเจือปน การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรวมถึงการเกิดชั้นของสารประกอบออกไซด์บนผิวของอนุภาค (Hashim, Looney and Hashmi, 1999)

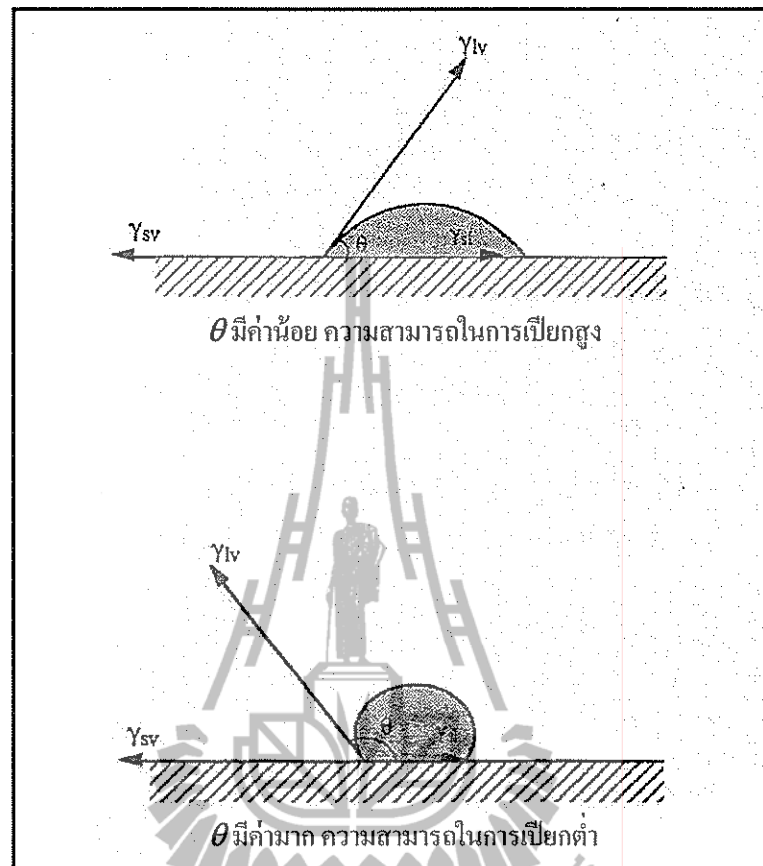
ความสามารถในการเปียกจึงเป็นปัญหาที่สำคัญของการผลิตวัสดุเชิงประกอบ โดยความสามารถในการเปียก อาจนิยามได้ว่า ความสามารถของของเหลวที่สามารถแพร่กระจายไปบนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งบ่งบอกได้ถึงขอบเขตของการสัมผัสของพื้นที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว แสดงในรูป 2.6 ได้แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่เกี่ยวข้องกับสมบัติในการเปียกของอนุภาคของแข็งกับของเหลว ซึ่งถูกกำหนดด้วยค่ามุมสัมผัสระหว่างพลังงานพื้นผิวของอนุภาคและของเหลว (Contact angles:  $\theta$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเปียกระหว่างอนุภาคและของเหลวดังนี้

$\theta = 0$	ของเหลวจะสามารถเปียกกับของแข็งได้อย่างสมบูรณ์
$\theta = 180$	ของเหลวไม่สามารถเปียกกับของแข็งได้
$0 < \theta < 180$	ของเหลวสามารถเปียกกับของแข็งได้บางส่วน

จากสมการสมดุลแรง จะพิจารณาพลังงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ได้แก่ พลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว ( $\gamma_{sl}$ ) พลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและอากาศ ( $\gamma_{sv}$ ) และพลังงานพื้นผิวระหว่างของเหลวและอากาศ ( $\gamma_{lv}$ ) ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปสมดุลสมการ ดังแสดงในสมการที่ 2.4 และผลเฉลยของค่า  $\theta$  ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_{sv} \quad (2.4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \right] \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.6 แสดงการระบุมุมสัมผัส ( $\theta$ ) ของพลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งเป็นเทอมที่บ่งบอกสมบัติในการเปียก (Chawla, 2003)

เมื่อความสามารถในการเปียกถูกกำหนดด้วยเทอมของค่า  $\theta$  เมื่อ  $\theta$  มีค่าน้อย ย่อมแสดงว่า ของเหลวสามารถเปียกกับพื้นที่ผิวของอนุภาคได้มากขึ้น จากการพิจารณาผลเฉลยของค่า  $\theta$  ในสมการที่ 2.5 พบว่าถ้าหาก ค่า  $\gamma_{sl} < \gamma_{sv}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า  $\theta$  จะลดลง ซึ่งย่อมหมายถึงความสามารถในการเปียกที่เพิ่มขึ้น (Hashim, Looney, and Hashmi, 1999, 2001) การปรับปรุงความสามารถในการเปียกนั้นทำได้โดย การเพิ่มพลังงานพื้นที่ผิวของอนุภาค การลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะ เพื่อเป็นการลดพลังงานพื้นผิวระหว่างอนุภาคและน้ำโลหะ  $\gamma_{sl}$  ซึ่งหมายถึงการลดมุมสัมผัสระหว่างพลังงานพื้นผิวของของแข็งและของเหลว (Hashim, et al., 1999, 2001)

การลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะสำหรับงานหล่อ ด้วยวิธีทั่วไปที่ใช้ซึ่งเป็นวิธีเพิ่มสมบัติการเปียกด้วยปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดพันธะที่มีความแข็งแรงระหว่างเซรามิกและโลหะนั้นทำได้ด้วยวิธีการเติมธาตุผสม ได้แก่ แมกนีเซียม ไทเทเนียม และ เซอร์โคเนียมลงในน้ำโลหะ หลอมเหลว เพื่อช่วยลดแรงตึงผิวและเพิ่มสมบัติการเปียก ลดพลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว สำหรับวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียม แมกนีเซียมเป็นธาตุผสมที่ให้ผลดีที่สุดต่อ

การรวมวัสดุเสริมแรงประเภทอนุภาคให้ผสมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมและช่วยทำให้อนุภาคมีการกระจายตัวที่ดีบนเฟสพื้นอะลูมิเนียม ได้มีการทดลองยืนยันว่า การใช้แมกนีเซียมเป็นธาตุผสมให้ผลที่ดีกว่าการใช้ ซีเรียม แลนทานัม บิสมัท เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม สังกะสี และทองแดง เป็นธาตุผสม ทั้งนี้เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นธาตุที่มีค่าแรงตึงผิวน้อย ( $0.599 \text{ Nm}^{-1}$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม ( $0.760 \text{ Nm}^{-1}$ ) หรือ โลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน 11.8 เปอร์เซ็นต์ ( $0.817 \text{ Nm}^{-1}$ ) เมื่อเติมแมกนีเซียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจาก  $0.760 \text{ Nm}^{-1}$  ลงมาที่  $0.620 \text{ Nm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส (Hashim, et al.) นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าเติมแมกนีเซียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดพลังงานพื้นผิวจาก  $860 \text{ dynNm}^{-1}$  เหลือ  $650 \text{ dynNm}^{-1}$  แมกนีเซียมเป็นธาตุผสมที่มีความจำเป็นอย่างมากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม โดยพบว่าปริมาณแมกนีเซียมที่เหมาะสมคือประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Hashim, et al.) ซึ่งเป็นปริมาณที่ส่งผลดีต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์บนเฟสพื้นอะลูมิเนียมและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

นอกจากการเพิ่มสมบัติการเปียกด้วยปฏิกิริยาเคมีแล้ว การเพิ่มสมบัติในการเปียกยังสามารถทำได้ด้วยการให้ความร้อนกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ประมาณ 900 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดชั้นสารประกอบออกไซด์หุ้มอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เนื่องจากเป็นชั้นสารประกอบที่เพิ่มสมบัติการเปียกระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และน้ำโลหะหลอมเหลว นอกจากนี้การให้ความร้อนแก่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ยังเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนและก๊าซบริเวณผิวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Hashim, et al.)

## 2.6.2 ลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์บนโลหะพื้นอะลูมิเนียม

การเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์กับโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว นั้นเป็นเพียงการเพิ่ม โอกาสที่ทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าไปผสมอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ เนื่องจากยังมีปัญหาในเรื่องของความหนาแน่นที่มีความแตกต่างกันระหว่างอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ทำให้อะลูมิเนียมกับซิลิคอนคาร์ไบด์แยกชั้นกัน โดยจะมีซิลิคอนคาร์ไบด์บางส่วนตกตะกอนลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมเนื่องจากซิลิคอนคาร์ไบด์มีความหนาแน่นมากกว่าอะลูมิเนียม แต่จะมีซิลิคอนคาร์ไบด์บางส่วนมักจับตัวกันเป็นกลุ่มและอยู่ร่วมกับอากาศ และเนื่องจากน้ำโลหะอะลูมิเนียมมีแรงตึงผิวทำให้กลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์นี้ลอยอยู่บนน้ำโลหะอะลูมิเนียม ดังนั้นการที่จะทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าไปผสมกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้น ต้องใช้เทคนิคในการกวนผสม โดยลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์จะขึ้นอยู่กับเวลาและความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม เพราะถ้าใช้ความเร็วและเวลาในการกวนผสมมากเกินไป จะทำให้เกิดฟองอากาศในโครงสร้างทางจุลภาค แต่ถ้าใช้ความเร็วและเวลาในการกวนผสม

น้อยเกินไป ก็จะพบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ ( $\text{SiC}_p$ -Cluster) กระจายอยู่ร่วมกับรูพรุนบนโลหะพื้น อะลูมิเนียม (Balasivanandha Prabu, Karunamoorthy, Kathiresan, and Mohanb, 2006) นอกจากนี้ใช้ การกวนผสมแล้ว สถานะของน้ำโลหะอะลูมิเนียมขณะที่เติมซิลิคอนคาร์ไบด์และทำการกวนผสม ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติการเปียก ซึ่งพบว่าถ้าเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ลงในอะลูมิเนียมและ กวนผสมเมื่ออะลูมิเนียมอยู่ในสถานะหลอมเหลวเป็นผลทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่สามารถผสมกับ อะลูมิเนียมได้ แต่หากทำการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์และกวนผสมในขณะที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมอยู่ใน สถานะกึ่งแข็ง (Semisolid) จะทำให้พบซิลิคอนคาร์ไบด์ในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยัง พบว่าถ้าหากมีการเติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักร่วมด้วย ทำให้พบปริมาณของซิลิคอน คาร์ไบด์มากขึ้นอีก แต่อย่างไรก็ดีการกวนผสมจะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เนื่องจากหากไม่ใช้การกวนผสม ซิลิคอน คาร์ไบด์จะไม่สามารถเข้าไปผสมกับอะลูมิเนียมได้เลย ถึงแม้ว่าจะเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ลงในน้ำ โลหะอะลูมิเนียมในสถานะกึ่งแข็งหรือเพิ่มความสามารถในการเปียกด้วยการเติมแมกนีเซียมเพื่อ เป็นการลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม (Hashim, et al.)

## 2.7 การเกิดสารประกอบเชิงโลหะบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างซิลิคอนคาร์ไบด์กับ อะลูมิเนียม

ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ ในขณะที่อะลูมิเนียมอยู่ในสถานะหลอมเหลวและทำให้เกิดสารประกอบอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ ( $\text{Al}_4\text{C}_3$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเปราะสูงและไม่มีความเสถียร และยังมีความไวกับการ เกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการผุกร่อนได้ง่าย (Jae-Chul, Jae-Pyoung, Jae-Hyeok, Zhongliang and Ho-In, 1999) การเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ในการหล่อขึ้นรูปวัสดุเชิง ประกอบพื้นอะลูมิเนียม แสดงในสมการที่ 2.6 แต่สามารถป้องกันได้โดยการทำให้เกิด สารประกอบซิลิคอนออกไซด์บริเวณผิวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อเป็นแนวป้องกันการเกิด สารประกอบอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ ดังสมการที่ 2.7 (Villegas, Sierra, Lucas, Fern'andez, and Caballero, 2007)



สารประกอบซิลิคอนออกไซด์นอกจากจะเป็นแนวป้องกันการเกิดสารประกอบอะลูมิเนียม คาร์ไบด์แล้วยังมีคุณสมบัติที่ดีในเรื่องการเพิ่มความสามารถในการเปียก (Wettability) ให้กับ

อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และลวดมัมสัมผัสระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กับอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Urena, Martinez, Rodrigo and Gil, 2004) โดยได้มีการศึกษาว่าการให้ความร้อนกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสขึ้นไปจะทำให้เกิดขึ้นของสารประกอบซิลิคอนออกไซด์เคลือบอนุภาคซิลิคอนที่มีความต่อเนื่องเป็นแนวป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิคอน (Hashim, Looney and Hashmi, 2006)

## 2.8 กลไกการเพิ่มความแข็งแรง (Strengthening Mechanisms)

### 2.8.1 การเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากขอบเกรน (Strengthening by Grain boundary)

ขอบเกรน (Grain Boundary) จะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) แสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นการที่โลหะมีความหนาแน่นของขอบเกรนเพิ่มขึ้นย่อมทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน วิธีการทำให้โลหะมีขนาดเกรนที่เล็กละเอียดจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของขอบเกรน การลดขนาดเกรนจึงเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ โดยความแข็งแรงของโลหะที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากขอบเกรนอธิบายด้วยสมการ Hall-Petch Equation ดังแสดงสมการที่ 2.8 (William and David, 2008)

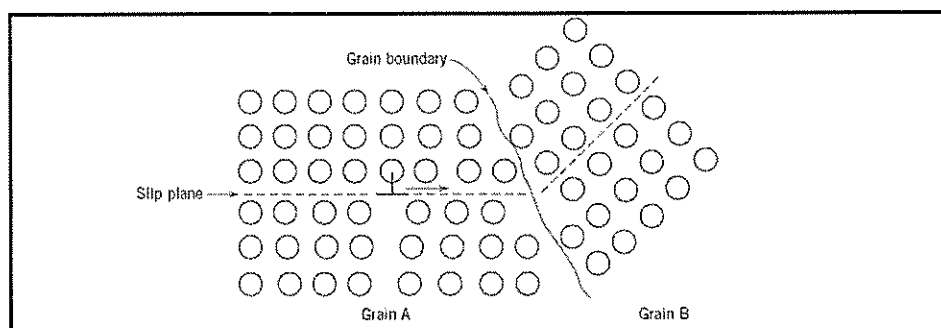
$$\sigma_0 = \sigma_f + kd^{-1/2} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\sigma_f$  = ความเค้นเสียดทาน (Friction Stress)

$\sigma_0$  = ความเค้นจุดคราก (Yield Stress)

k = ตัวแปลควบคุม (Locking Parameter)

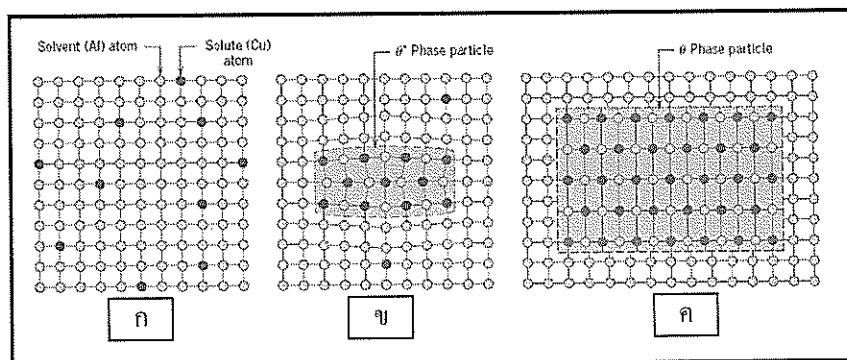
d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเกรน (Grain Diameter)



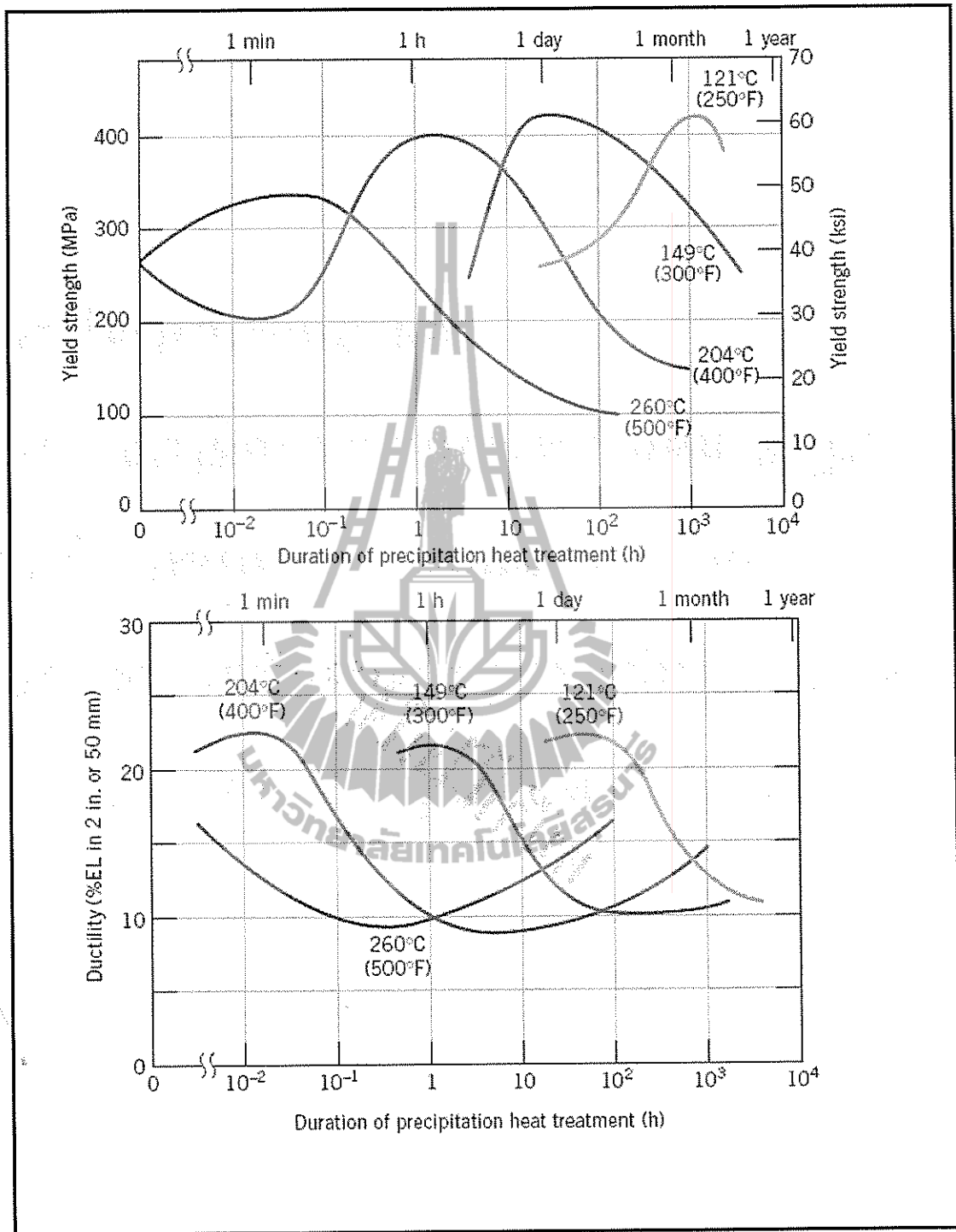
รูปที่ 2.7 แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านขอบเกรน (William and David, 2008)

## 2.8.2 การเพิ่มความแข็งแรงจากกระบวนการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Precipitation Strengthening)

ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงนั้นเป็นรูปแบบหนึ่งของกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยเฟสกระจายอนุภาค (Dispersion Strengthening) ในกรณีที่เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียดมาก (Fine particle) โดยความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดขึ้นจากกระบวนการบ่มแข็ง (Ageing) เมื่อโลหะผสมที่ผ่านขั้นตอนทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้มีสมบัติเป็นสารละลายของแข็งอิมิตัววยดิ่งซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียรและมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งอิมิตัววยดิ่งไปยังเฟสที่มีพลังงานต่ำกว่าซึ่งมีความเสถียรตามเฟสสมดุล เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากการบ่มแข็งโลหะผสมที่อยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิมิตัววยดิ่งจะเริ่มเกิดการตกตะกอนของเฟสที่สองและรวมกันเป็นกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่า "precipitation zone หรือ GP Zone" ซึ่งทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนของดิสโลเคชันในช่วงแรกของการบ่มแข็ง การตกตะกอนของเฟสที่สองจะเป็น Coherency กับระนาบของแลตทิซหลักของโลหะผสม แต่ถ้าเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งเฟสที่ตกตะกอนก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสูญเสียความเป็น Coherency หรือเรียกว่า Incoherency แสดงในรูปที่ 2.8 ความแข็งแรงของโลหะผสมจะเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวจะลดลงเมื่อเฟสที่ตกตะกอนยังเป็น Coherency แต่เมื่อเฟสที่ตกตะกอนโดนเข้าสู่สถานะ Incoherency ความแข็งแรงของโลหะผสมจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการบ่มแข็งจะมีพลังงานกระตุ้นสูงทำให้เฟสที่สองเกิดการตกตะกอนและโตเร็วกว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำซึ่งมีพลังงานกระตุ้นน้อย อุณหภูมิและเวลาในการบ่มแข็งจึงมีผลต่อความแข็งแรงและความเหนียวของโลหะ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่สองที่ตกตะกอนจากการบ่มแข็ง ก) เริ่มเกิดการตกตะกอนของอนุภาค ข) เฟสที่ตกตะกอนยังเป็น Coherency ค) เฟสที่ตกตะกอนเป็น Incoherence (William and David, 2008)



รูปที่ 2.9 แสดงผลกระทบจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแข็งต่อความแข็งแรงและความเหนียว (Smallman and Bishop, 1999)

ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงนั้น เกิดจากการที่ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ผ่านเฟสที่สองในช่วงที่เป็น Coherency นั้นจะเกิดกลไกการเคลื่อนที่แบบตัดผ่านอนุภาค (Cutting particle) แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งความเค้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันแสดงในสมการที่ 2.9 ส่วนเมื่อเฟสที่สองมีขนาดโตขึ้นและเข้าสู่การเป็น Incoherency จะเกิดกลไกการโอบของดิสโลเคชันรอบ ๆ อนุภาค (Particle looping หรือ Bow cut) แสดงดังรูปที่ 2.11 ความเค้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะแสดงดังสมการที่ 2.10 (Courtney, 1990)

$$\text{แรงเฉือนที่ดิสโลเคชันใช้ในการเคลื่อนที่แบบตัดผ่าน} \quad \tau = \frac{r\gamma\pi}{bL} \quad (2.9)$$

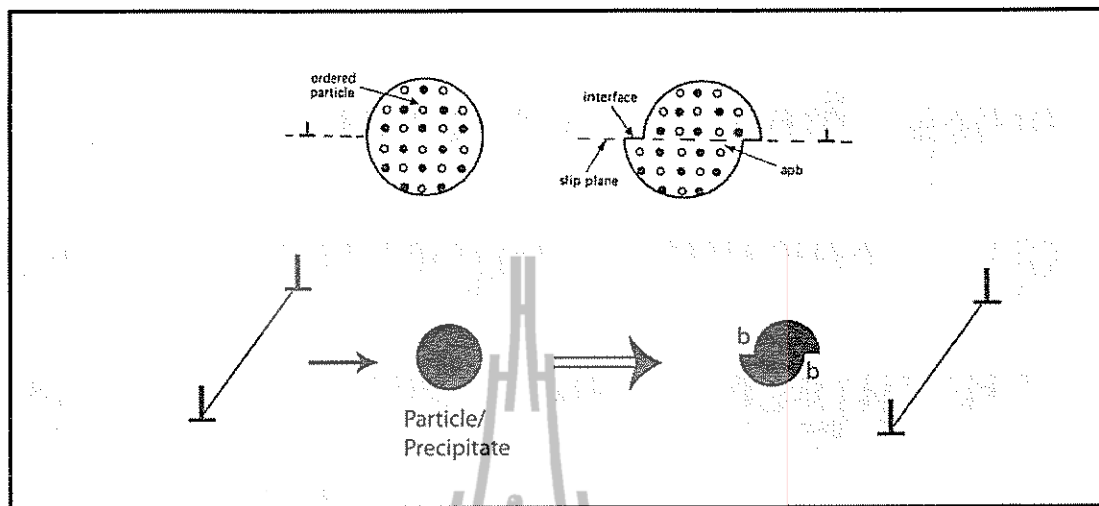
$$\text{แรงเฉือนที่ดิสโลเคชันใช้ในการเคลื่อนที่แบบโอบ} \quad \tau = \frac{Gb}{L-2r} \quad (2.10)$$

โดยที่

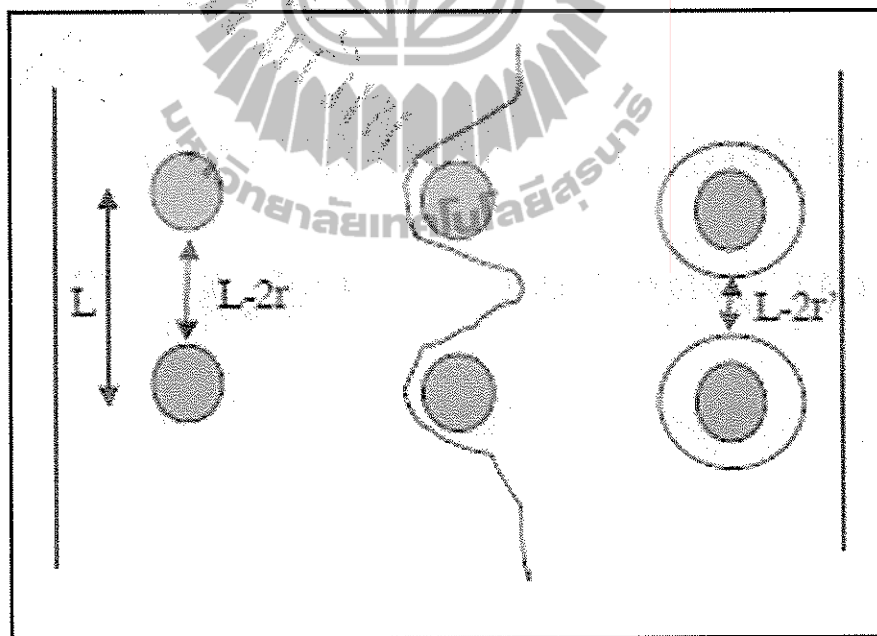
- $\tau$  คือ แรงเฉือน
- $r$  คือ รัศมีของอนุภาค
- $G$  คือ มอดูลัสแรงเฉือน
- $L$  คือ ระยะห่างระหว่างอนุภาค

จากสมการที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นแรงเฉือนที่ดิสโลเคชันใช้ในการเคลื่อนที่แบบตัดผ่าน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเค้นแรงเฉือนและรัศมี ( $r$ ) ของเฟสที่สองตกตะกอน พบว่าเมื่อค่า  $r$  เพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของขนาดเฟสที่สองตกตะกอนจะทำให้ค่าความเค้นแรงเฉือนที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นดังนั้นความแข็งแรงของโลหะผสมจะเพิ่มขึ้น ส่วนสมการที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการโอบล้อมของดิสโลเคชัน โดยเมื่อพิจารณาในเทอมของ  $L-2r$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $r$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากการโตของเฟสที่สองตกตะกอนเป็นการ โตภายใต้การคงที่ของสัดส่วนโดยปริมาตร (Constant volume fraction) ซึ่งเป็นการ โตแบบที่เรียกว่า “Coarsening” ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการที่ปลาตัวใหญ่กินปลาเล็ก โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งที่ มีขนาดใหญ่มากก็จะโตขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนเฟสที่มีขนาดเล็กก็จะหายไป (Smallman and Bishop, 1999) ดังนั้นจากสมการ 2.10 เมื่อค่า  $r$  เพิ่มขึ้นความเค้นแรงเฉือนที่ดิสโลเคชันใช้ในการเคลื่อนที่จะลดลง โดยในรูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเมื่อมีการเพิ่มขนาดของเฟสที่สองตกตะกอน

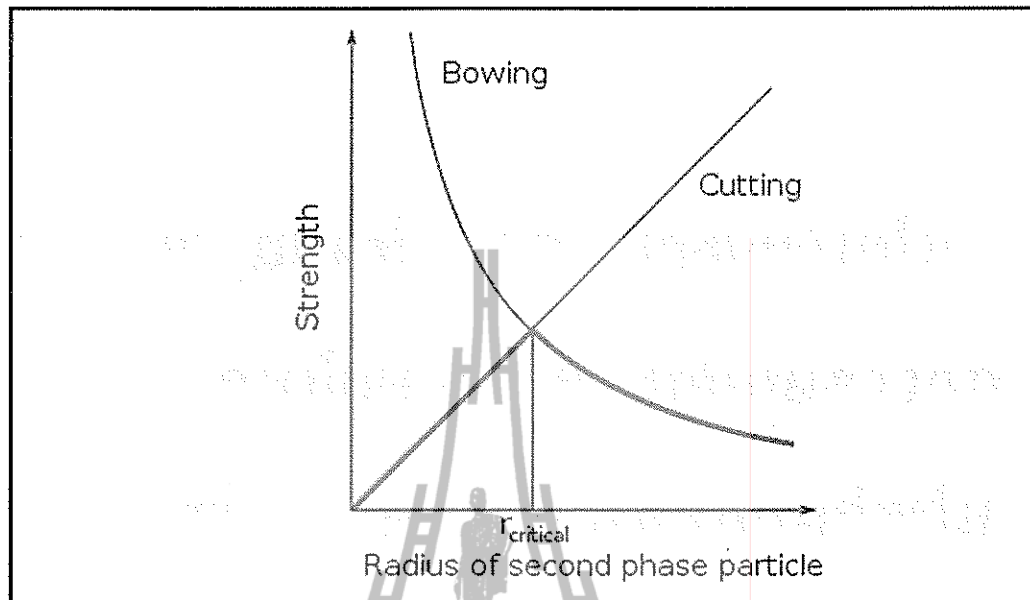




รูปที่ 2.10 แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่าน GP Zone แบบตัดผ่าน (Smallman and Bishop, 1999)



รูปที่ 2.11 แสดงการโอบของดิสโลเคชันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเฟสที่ตกตะกอน (Courtney, 1990)



รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเมื่อขนาดของเฟสที่ตกตะกอนเพิ่มขึ้น

(Courtney, 1990)

### 2.8.3 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยเฟสการกระจายของอนุภาคเสริมแรง

กลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายเฟสอนุภาค จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน แต่อุณหภูมิเสริมแรงขนาดเล็กที่กระจายในโลหะพื้นจะเป็นเฟสที่มีความเสถียรและมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคที่ตกตะกอนจากกระบวนการ precipitation hardening ซึ่งเป็นเฟสที่มีขนาดเล็กมาก (Sub - micron) และไม่มีความเสถียร ส่วนอนุภาคของเฟสเสริมแรงถึงแม้จะมีขนาดใหญ่กว่าเฟสที่เกิดการตกตะกอนแต่ก็ยังมีความเสถียรอยู่ในระดับไมโครเมตร จึงสามารถกระจายในเฟสพื้น โดยอนุภาคที่สามารถกระจายได้ในโลหะพื้นนี้มีประโยชน์ในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น ถึงแม้ว่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นจากการกระจายของเฟสเสริมแรงนี้จะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรง ณ อุณหภูมิห้อง เพิ่มขึ้นน้อยกว่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการบ่มแข็งซึ่งมีพันธะการยึดเกาะของอนุภาคที่ตกตะกอนก็ตาม อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบนี้ไม่สามารถทำให้อ่อนตัวได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง หรือด้วยการเค็มโตของเกรน หรือด้วยการที่เฟสกระจายตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเท่านั้น และสามารถต้านทานต่อการคืบได้ดีกว่าวัสดุกลุ่มโลหะและโลหะผสม (กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และคณะ, 2553)

สำหรับกลไกการเพิ่มความแข็งแรงโลหะพื้นด้วยอนุภาคขนาดเล็กนั้นจะพิจารณา 3 กลไกที่เกิดขึ้นและเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ได้แก่ ผลกระทบจากขนาดของเกรน (Grain size effect) ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation density) และผลจากเฟสที่กระจาย (Dispersion strengthening)

ผลกระทบของปริมาณของเฟสที่กระจายต่อขนาดของเกรน แสดงในสมการที่ 2.11 ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าโดยความแข็งแรงของโลหะที่เพิ่มขึ้นจากสมการของ Hall-Petch Equation ในสมการที่ 2.8 ส่วนผลกระทบจากความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่จะเพิ่มขึ้นย่อมทำให้ความแข็งแรงของโลหะเพิ่มขึ้น โดยผลกระทบจากเฟสอนุภาคเสริมแรงต่อความหนาแน่นของดิสโลเคชันจะเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนโดยปริมาตรและขนาดของเฟสกระจาย ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งจะพบว่าเมื่อขนาดของเฟสที่เสริมแรงเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงลดลงแต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเฟสกระจายจะให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น (Schwartz, 1996)

$$\text{Grain Size} = d \left( \frac{1-F_v}{F_v} \right)^{1/3} \quad (2.11)$$

$$\text{Dislocation density} = f \left( \frac{\text{volume fraction}}{\text{particle size}} \right) \quad (2.12)$$

โดยที่

$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของเกรน (Grain Diameter) ของโลหะ

$F_v$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสกระจาย

สำหรับความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากเฟสกระจายอธิบายได้จาก Orowan looping (Schwartz, 1996) อนุภาคที่กระจายตัวในโลหะนั้นจะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน แสดงดังรูปที่ 2.13 – 2.14 สามารถหาค่าความเค้นจุดครากได้จากสมการ ที่ 2.13 (Courtney, 1990)

$$\tau = \frac{Gb}{L} \cos \frac{\phi}{2} \quad (2.13)$$

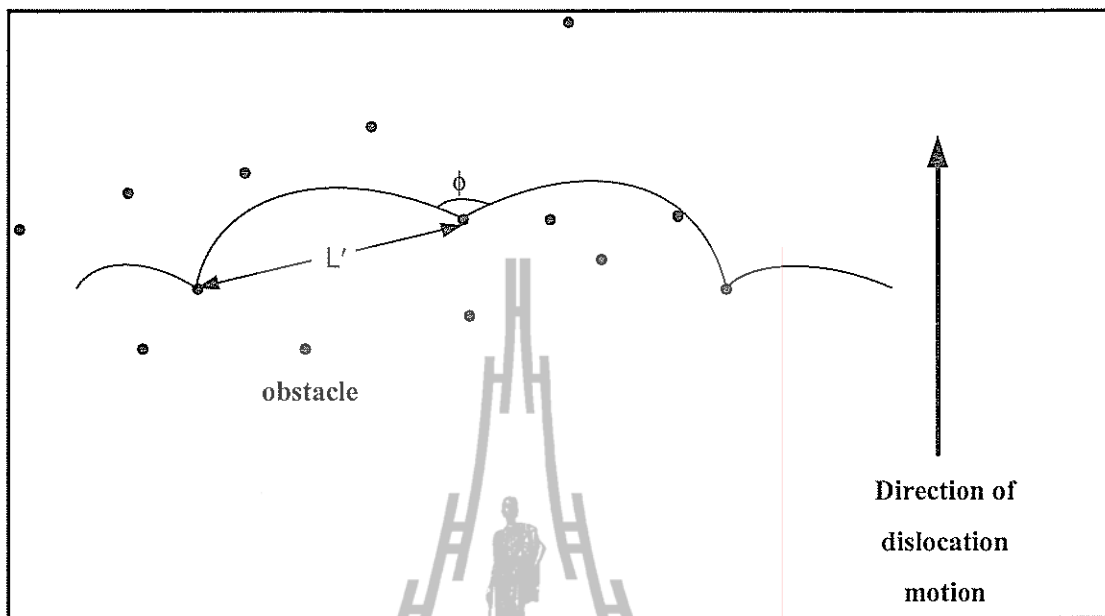
โดยที่

$\tau$  = แรงเฉือน

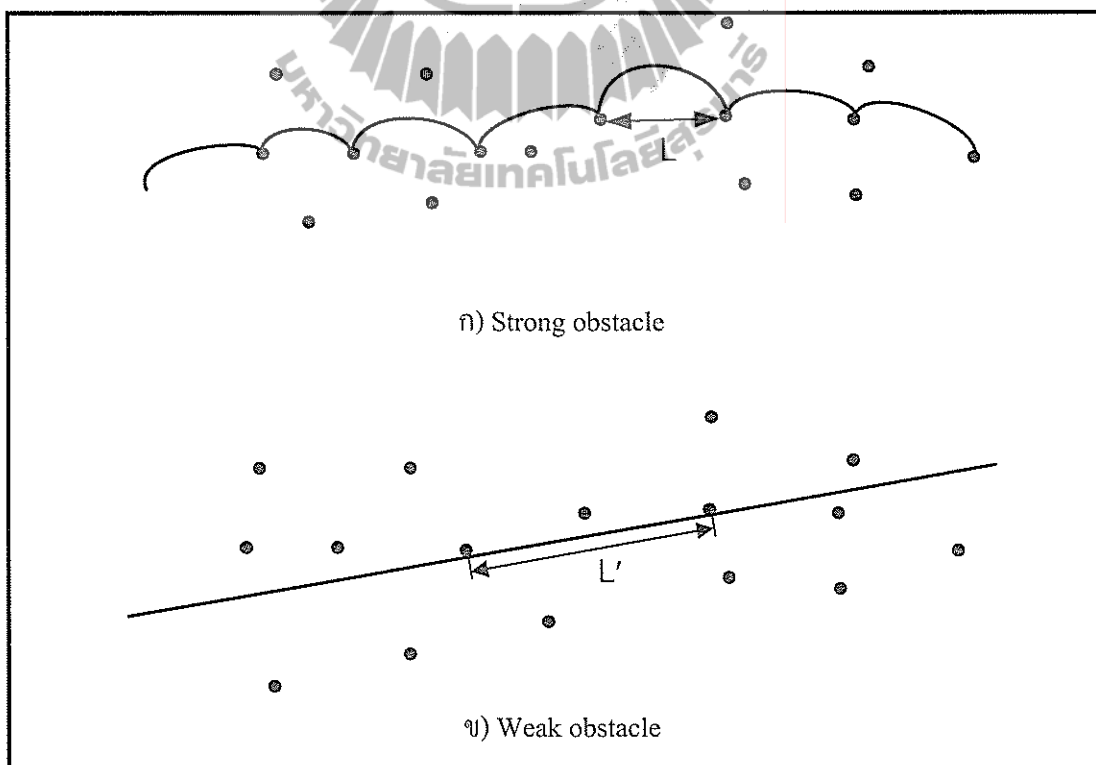
$G$  = มอดูลัสแรงเฉือน

$L$  = ระยะห่างระหว่างอนุภาค

$\phi$  = มุมของดิสโลเคชันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านอนุภาค



รูปที่ 2.13 แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านอุปสรรค (Courtney, 1990)



รูปที่ 2.14 แสดงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านอุปสรรค ก) อนุภาคแข็ง ข) อนุภาคอ่อน (Courtney, 1990)

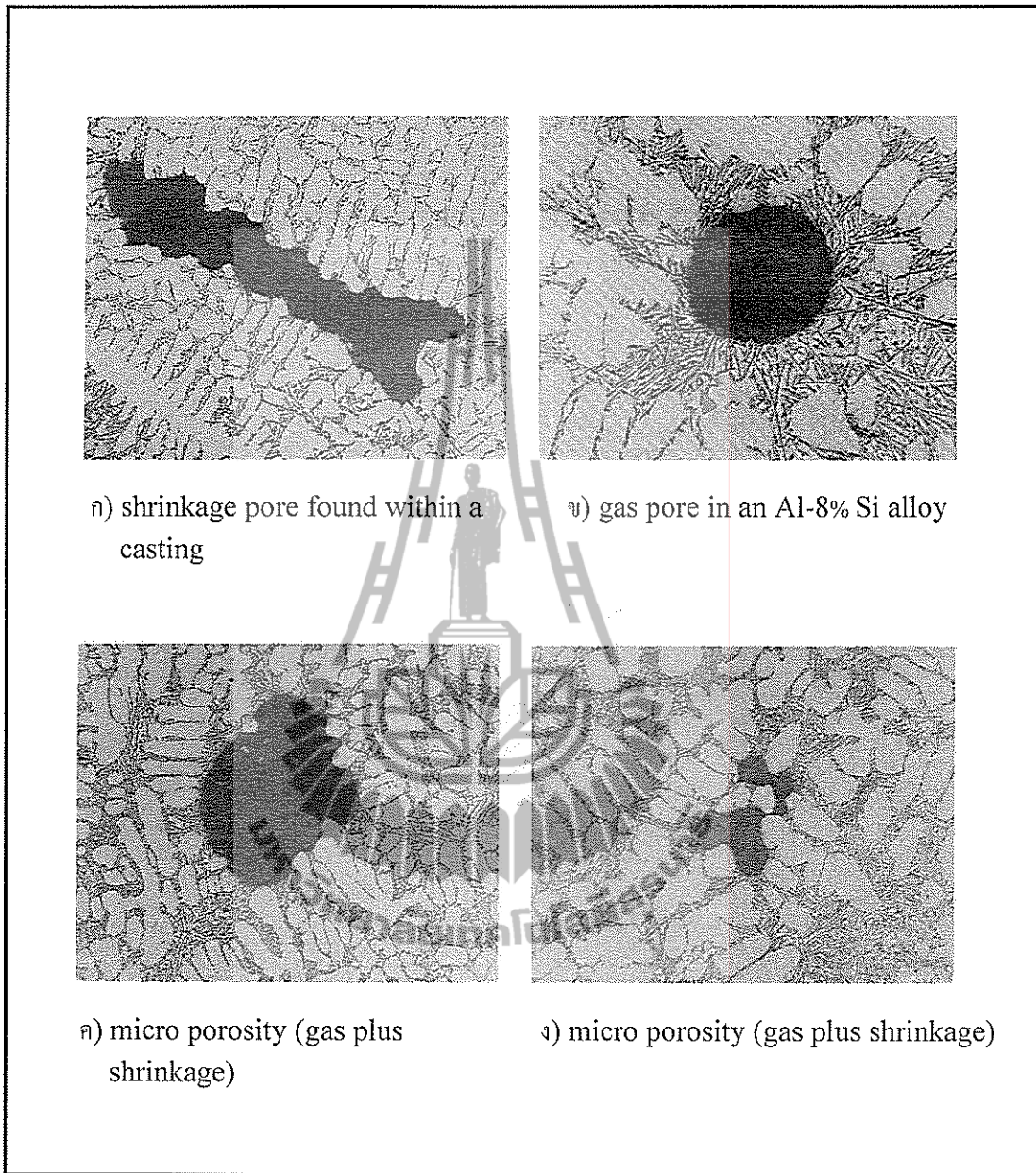
## 2.9 จุดบกพร่องของชิ้นงานหล่อ

ในกระบวนการแข็งตัวของโลหะอาจทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นในชิ้นงานหล่อ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบ แต่จุดบกพร่องที่สำคัญและควรพิจารณาอย่างระมัดระวัง ได้แก่ รูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage) และรูพรุนจากก๊าซ (Gas porosity) เนื่องจากหากชิ้นงานมีรูพรุนอยู่ภายในอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานพังทลายได้เมื่อนำไปรับแรง

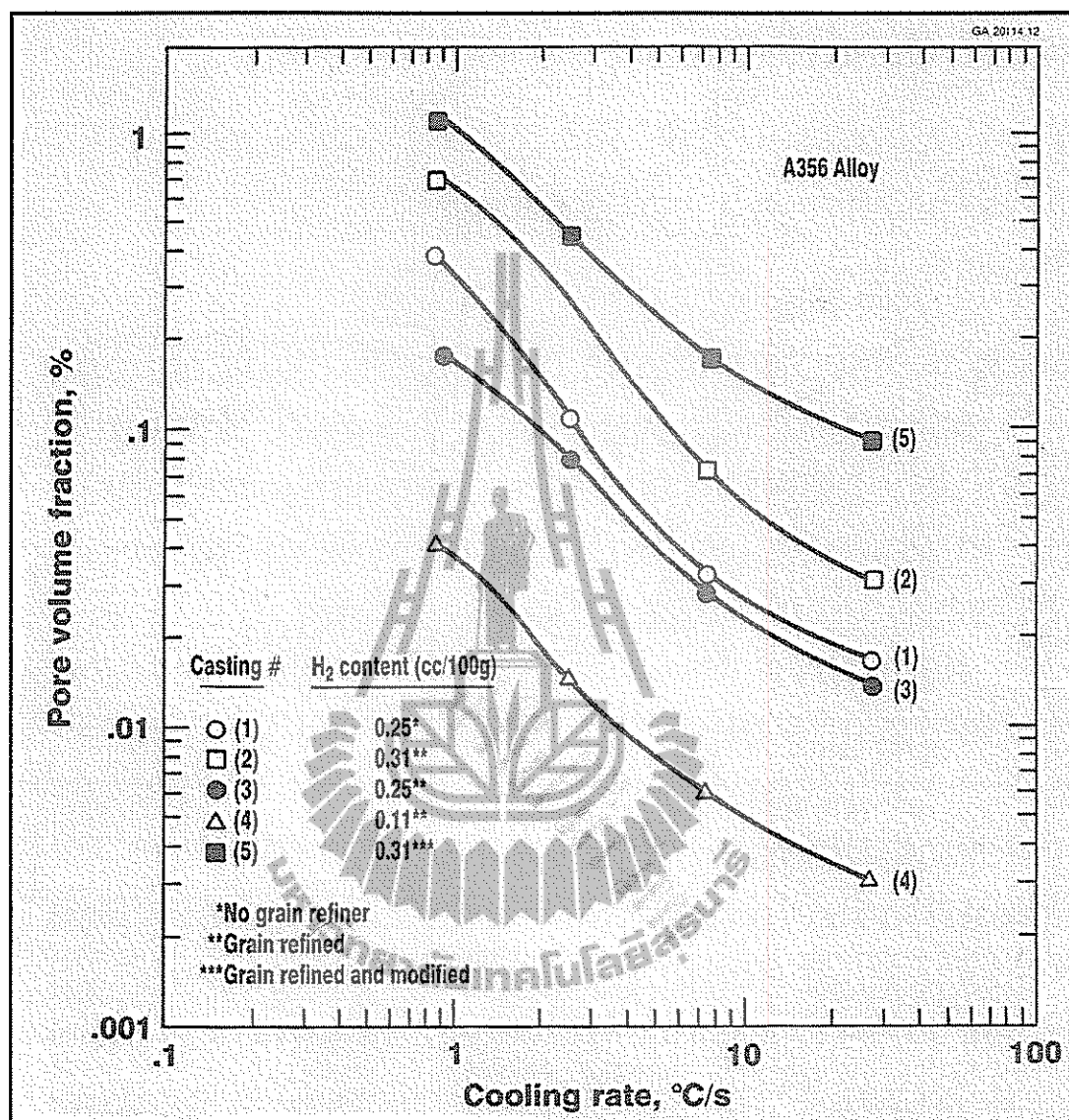
รูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage) วัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็งย่อมมีความหนาแน่นสูงกว่าในสถานะของเหลว เหตุนี้ในขณะที่เกิดการแข็งตัววัสดุมักเกิดการหดตัว สำหรับอะลูมิเนียมเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งจะเกิดการหดตัว 7 เปอร์เซ็นต์ (กิตติพงษ์ กิมะพงค์ และคณะ, 2553) โดยรูพรุนจากการหดตัวนี้จะเกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะที่หดตัวขณะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและมีการหดตัวของโลหะเข้าไปแทนที่ในส่วนช่องว่างที่เกิดการหดตัวนี้ได้ไม่เพียงพอ (John and Bernard, 1990) จึงมีช่องว่างเกิดขึ้นล้อมรอบเกรนไครสต์หรือเกรนแสดงในรูปที่ 2.15 ก)

การเกิดรูพรุนเนื่องจากก๊าซ (Gas Porosity) ตามปกติแล้วก๊าซไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพิ่มมากขึ้นเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งในกระบวนการแข็งตัวของโลหะนั้นและเริ่มมีเฟสของแข็งเกิดขึ้นก๊าซไฮโดรเจนจะถูกผลักออกมายังอันตรภาคระหว่างของแข็งและของเหลว จนกระทั่งกระบวนการแข็งตัวของโลหะเสร็จสิ้น รูพรุนจากก๊าซไฮโดรเจนที่มีรูปร่างค่อนข้างกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ข) จะถูกผลักออกมายังบริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นส่วนที่แข็งตัวช้าที่สุดในโครงสร้างจุลภาค (John and Bernard)

รูพรุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะทั้งรูพรุนจากการหดตัวและรูพรุนจากก๊าซ อาจเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งหรืออาจเกิดขึ้นรวมกันและอยู่บริเวณขอบเกรนในโครงสร้างจุลภาค (John and Bernard) แสดงในรูปที่ 2.15 ค)-ง) ถึงแม้ว่าสาเหตุของการเกิดรูพรุนจากกระบวนการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียมจะมีสาเหตุหลักมาจากการหดตัวและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะก็ตาม แต่พบว่ามีปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อปริมาณการหดตัวที่เกิดขึ้นและความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียม ได้แก่ อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) การปรับปรุงโครงสร้างด้วยการเติมธาตุผสมทั้งเพื่อลดขนาดเกรนและการทำโมดิฟิเคชัน ดังนั้นปัจจัยดังกล่าวจึงมีผลกระทบต่อปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในงานหล่อ โดยมีอัตราการเย็นตัวสูงจะทำให้มีปริมาณรูพรุนเกิดขึ้นน้อยในงานหล่อ ส่วนการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคด้วยการทำโมดิฟิเคชันร่วมกับการลดขนาดเกรนมีผลทำให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นในโครงสร้างจุลภาค (John and Bernard) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแข็งตัว (John and Bernard, 1990)



รูปที่ 2.16 แสดงสัดส่วน โดยปริมาตรของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการเย็นตัวของ อะลูมิเนียมเกรด A356 (John and Bernard, 1990)

## 2.10 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.10.1 การเป็ยกของเฟสที่เสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม

จากการทดลองของ Jae-Chul และคณะ (1999) ได้ศึกษาปัจจัยในการเกิดขึ้น สารประกอบของซิลิคอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ และผลกระทบต่อความเสถียรของชั้นสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  ที่อุณหภูมิสูงด้วยการเติม  $\text{Mg}_2$  เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ขั้นตอนการทำให้เกิดชั้นสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  นั้นด้วยการให้ความร้อน แก่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมงเพื่อให้

เกิดขึ้นสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  ที่มีความหนา 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร ในการทดลองนี้ใช้ โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2014 เป็นโลหะพื้น ส่วนอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้สำหรับเสริมแรง มีขนาดเฉลี่ย 5 ไมโครเมตร การทดสอบเสถียรภาพของชั้นสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  ที่อุณหภูมิสูง ด้วยการสังเกตการสูญเสียชั้นสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบมาให้ความร้อนจนอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะกึ่งแข็งที่อุณหภูมิ 610 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 200 ชั่วโมง และให้ความร้อนที่อะลูมิเนียมอยู่ในสถานะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากการสังเกตภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนแก่ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพียงพอที่จะทำให้เกิดชั้นสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  อย่างต่อเนื่องบริเวณผิวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม Mg ช่วยเพิ่มความเสถียรของชั้นสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  ที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ อุณหภูมิสูง

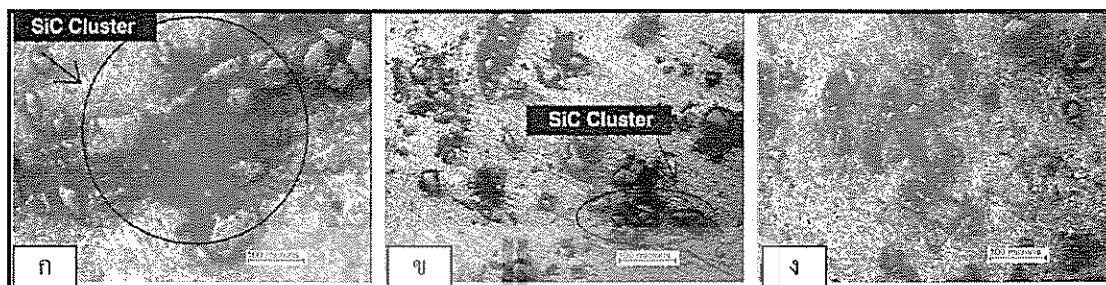
การทดลองของ J.Hashim และคณะ (2001) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการเปียกในการหล่อวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ได้แก่ การกวนผสม การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเติมแมกนีเซียม การกวนผสมในสถานะกึ่งแข็งหรือสถานะของเหลว โดยใช้อะลูมิเนียมเกรด A359 เป็นโลหะพื้นและซิลิคอนที่ใช้เสริมแรงมีขนาดเฉลี่ย 29.2  $\mu\text{m}$ . การวิเคราะห์ความสามารถในการเปียกของซิลิคอนคาร์ไบด์ในวัสดุเชิงประกอบจากภาพถ่าย โครงสร้างทางจุลภาค โดยนำปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ปรากฏในภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคเปรียบเทียบกับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงไป ซึ่งการทดลองแสดงให้เห็นว่า หากไม่มีการกวนผสมหรือทำการกวนผสมในขณะที่อะลูมิเนียมอยู่ในสถานะหลอมเหลวโดยไม่เติม Mg เป็นสองกรณีศึกษาที่ไม่พบซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวในวัสดุเชิงประกอบ สำหรับตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์พร้อมกับการหลอมอะลูมิเนียมและนำอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดชั้นของสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  จากกระบวนการออกซิเดชันมาเติมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมในสถานะกึ่งแข็งที่อุณหภูมิ 590 องศาเซลเซียส กวนผสมเป็นเวลา 10-15 นาที หลังจากนั้นเพิ่มความร้อนให้กับน้ำโลหะอะลูมิเนียมจนถึง 700 องศาเซลเซียส กวนผสมอีกเป็นเวลา 5 นาที ก่อนเทลงแบบหล่อ จะพบปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาคมากที่สุดในการทดลองนี้ จากการวิเคราะห์ภาพพบว่า ความสามารถในการเปียกมีค่าเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายใต้เงื่อนไขการหล่อและกวนผสมเช่นเดียวกันนี้ แต่ไม่เติมแมกนีเซียม 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความสามารถในการเปียกลดลงเหลือเพียง 66 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าหากมีการเติมแมกนีเซียมมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมในสถานะของเหลวกึ่งแข็งนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอุปสรรคในการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ ทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์เกาะกันเป็นกลุ่ม ( $\text{SiC}_p$ - Cluster) กระจายอยู่ใน



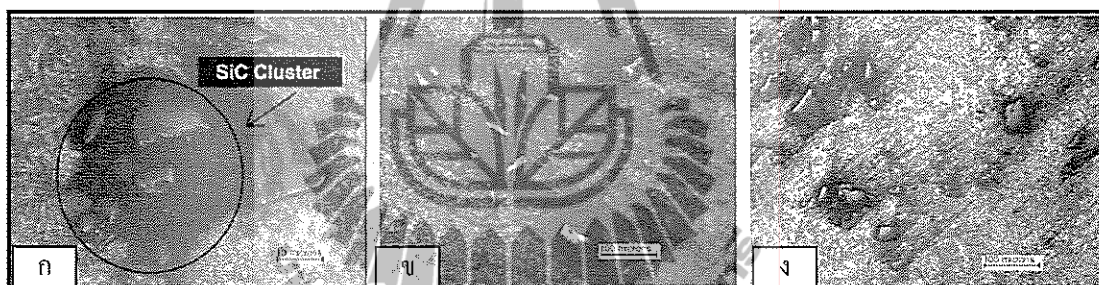
วัสดุเชิงประกอบ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการเติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกกระหว่างน้ำโลหะอะลูมิเนียมกับ ซิลิคอนคาร์ไบด์ ภายใต้เงื่อนไข 2 ประการ คือ ต้องเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมใน สภาวะกึ่งแข็งและต้องให้การกวนผสมก่อนเทลงแบบหล่อ จึงจะทำให้ ซิลิคอนคาร์ไบด์ สามารถเข้าไปผสมกับอะลูมิเนียมได้ใกล้เคียงกับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงไปมากที่สุด

### 2.10.2 การกระจายตัวของเฟสที่เสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม

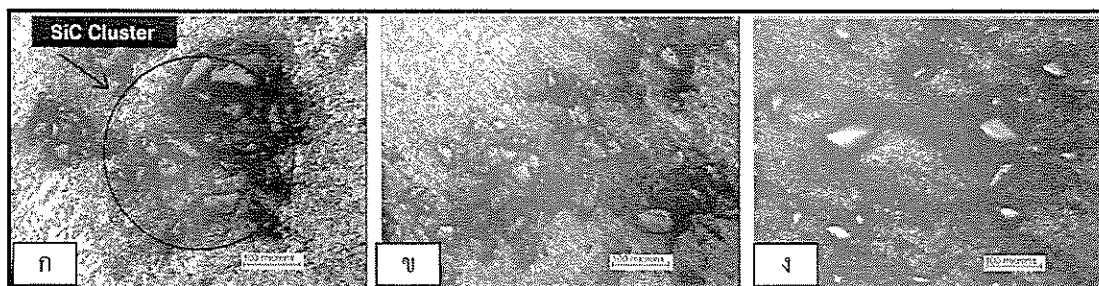
ลักษณะการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงใน โครงสร้างจุลภาคนั้นเป็นปัจจัยที่มีผล ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ การที่จะทำให้อนุภาคเซรามิกกระจายตัวได้ดีในเฟสพื้น อะลูมิเนียมนั้นนอกจากการเพิ่มความสามารถในการเปียกกระหว่างอนุภาคเซรามิกกับโลหะ อะลูมิเนียมหลอมเหลวแล้วยังต้องใช้ความเร็วและเวลาในการกวนผสมก่อนเทน้ำโลหะลงในแบบ หล่อให้เหมาะสมกับปริมาณการผลิตวัสดุเชิงประกอบ รายงานการศึกษาของ Balasivanandha, Karunamoorthy, Kathiresan และ Mohanb (2006) ที่แสดงถึงปัจจัยในการกวนผสมน้ำโลหะทั้ง ความเร็วและระยะเวลาที่ใช้กวนผสมน้ำโลหะก่อนเทลงแบบหล่อ ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้น อะลูมิเนียมเกรด A384 เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่มีขนาดเฉลี่ย 60 ไมโครเมตร ด้วย ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ความเร็วในการกวนที่แตกต่างกัน คือ 500 600 และ 700 รอบต่อ นาที เวลาที่ใช้คือ 5 10 และ 15 นาที ลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ใน โครงสร้าง จุลภาคของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แสดงในรูปที่ 2.17-2.19 จากการตรวจสอบภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคพบว่า การกวนน้ำโลหะโดยใช้ความเร็วหรือเวลาในการกวนผสมน้อยเกินไปจะ ไม่เพียงพอที่จะทำให้ ซิลิคอนคาร์ไบด์ กระจายออกจากกันจึงทำให้พบลักษณะของอนุภาคของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่จับกันเป็นกลุ่มอยู่ในบางตำแหน่งแต่เมื่อใช้ความเร็วหรือเวลาในการกวนผสม มากเกินไปจะทำให้พบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ โดยการ ใช้ความเร็วในการกวนน้ำโลหะ 700 รอบต่อ นาที ทำให้พบรูพรุนมากขึ้นใน โครงสร้างจุลภาค สำหรับการกระจายตัวของซิลิคอน คาร์ไบด์ในอะลูมิเนียมพบในเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ความเร็วในการกวนน้ำโลหะเท่ากับ 600 รอบ ต่อ นาที เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ใน โครงสร้างจุลภาค ดังกล่าวเป็นผลทำให้สมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบมีความแตกต่างกันตามตำแหน่งของ ชิ้นงานน้อยกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่นแสดงในรูปที่ 2.20 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การใช้ ความเร็วและเวลาในการกวนผสมน้ำโลหะก่อนเทลงแบบหล่ออย่างเหมาะสมจะทำให้ได้ลักษณะ การกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีใน โครงสร้างจุลภาคซึ่งเป็นผลดีทำให้สมบัติความแข็งแรงของ วัสดุเชิงประกอบมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน



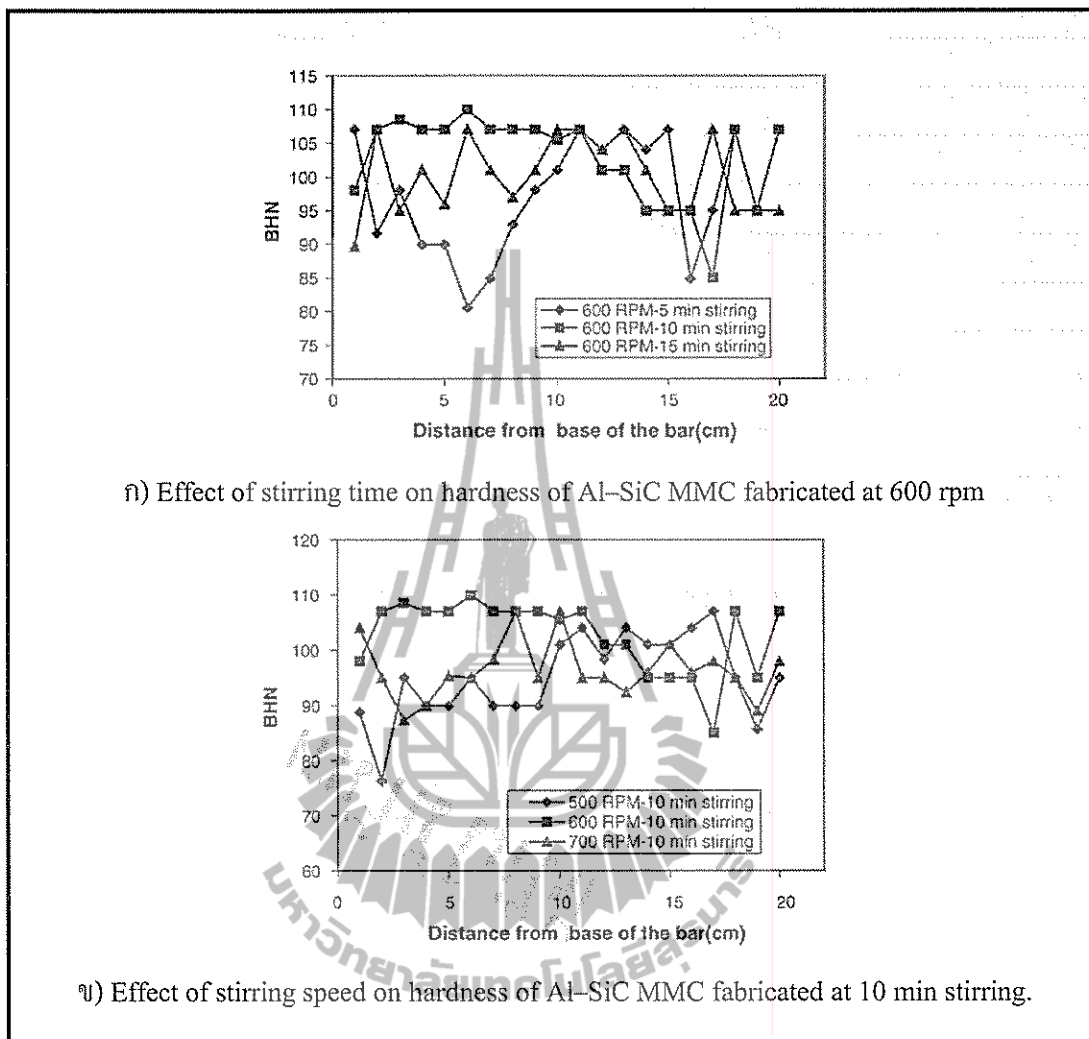
รูปที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์  
 กวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาทีและใช้เวลาในการกวนผสมคือ ก) 5 นาที  
 ข) 10 นาที ค) 15 นาที (Balasivanandha, et al, 2006)



รูปที่ 2.18 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์  
 กวนผสมด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีและใช้เวลาในการกวนผสมคือ ก) 5 นาที  
 ข) 10 นาที ค) 15 นาที (Balasivanandha, et al.)



รูปที่ 2.19 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์  
 กวนผสมด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการกวนผสมคือ ก) 5 นาที  
 ข) 10 นาที ค) 15 นาที (Balasivanandha, et al.)



รูปที่ 2.20 แสดงสมบัติความแข็งตามตำแหน่งของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ความเร็ว และเวลาในการกวนผสมแตกต่างกัน (Balasivanandha, et al.)

การทดสอบเบื้องต้นของรุ่งอรุณ บุญถ่าน (2553) ทดสอบสมบัติแรงดึงของ อะลูมิเนียม 356 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม สำหรับการเตรียม ซิลิคอนคาร์ไบด์ เริ่มจากให้ความร้อนที่ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัว ในอากาศและให้ความร้อนอีกครั้ง ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 650 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดยใช้ ความเร็วในการกวนผสม 500 600 และ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที และเทน้ำโลหะลงใน แบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.5 และผลกระทบ ต่อค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ จากการให้ความร้อนแก่ซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนที่จะ เติมนลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่แตกต่างกันคือ อุณหภูมิห้อง 650 และ 1,000 องศาเซลเซียส เป็น

เวลา 1 ชั่วโมง ก่อนเติมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่มีอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส กวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.6 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด คือเงื่อนไขการทดลองที่ให้ความร้อนแก่ซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนเติมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม ที่ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส กวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที และเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อ ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ความความเร็วในการกวนแตกต่างกัน

Casting Temp. °C \ V (rpm)	500						600		700	
	No.1-1	No.1-2	No.2-1	No.2-2	No.3-1	No.3-2	No.22-1	No.22-2	No.24-1	No.24-2
660	165.26	249.65	176.69	195.16	186.02	146.15	86.05	-	117.73	62.42
ค่าเฉลี่ย UTS (MPa)	186.49						86.05		90.07	

หมายเหตุ การเตรียมซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยการให้ความร้อน 1,000 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในอากาศ ให้ความร้อนอีกครั้งที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ ใช้ความเร็วในการกวนผสม 500 รอบต่อนาทีและให้ความร้อนแก่ซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนเทลงแบบหล่อด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

SiC <sub>p</sub> Temp. °C \ Casting Temp. °C	Room Temp.		650						1000	
	No.25-1	No.25-2	No.1-1	No.1-2	No.2-1	No.2-2	No.3-1	No.3-2	No.6-1	No.6-2
660	34.27	100.17	165.26	249.65	176.69	195.16	186.02	146.15	106.26	97.15
ค่าเฉลี่ย UTS (MPa)	67.22		186.49						101.70	

หมายเหตุ การเตรียมซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยการให้ความร้อน 1,000 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในอากาศ ให้ความร้อนอีกครั้ง (ด้วยอุณหภูมิ 650, 1000 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

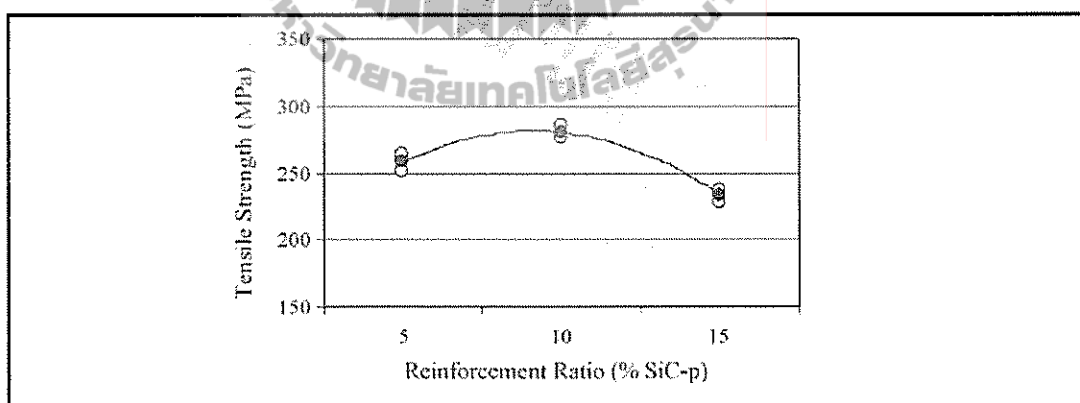
### 2.10.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์

การศึกษาของ Tamer, Erol และ Orhan ในปี 2008 โดยได้เตรียมตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณแตกต่างกันคือ 5 10

และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทดสอบความสามารถในการกลึงไส (Mechaniability properties) ในการทดลองนี้ใช้โลหะผสม Al7Si2Mg เป็นโลหะพื้น ทำการขึ้นรูปโดยใช้การหล่อแบบแรงดัน (Pressure Casting) โดยในส่วหนึ่งของ การทดลองได้ทำการทดสอบสมบัติความแข็ง และสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 แสดงผลการทดสอบสมบัติความแข็ง (Tamer, et al.)

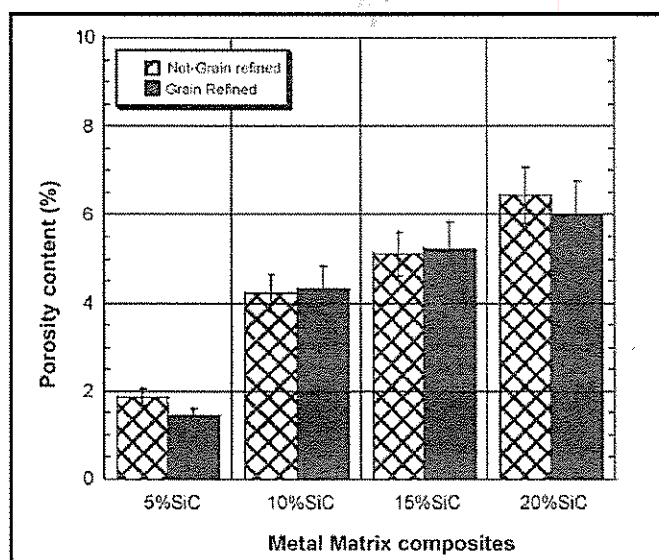


รูปที่ 2.22 แสดงผลการทดสอบสมบัติแรงดึง (Tamer, et al.)

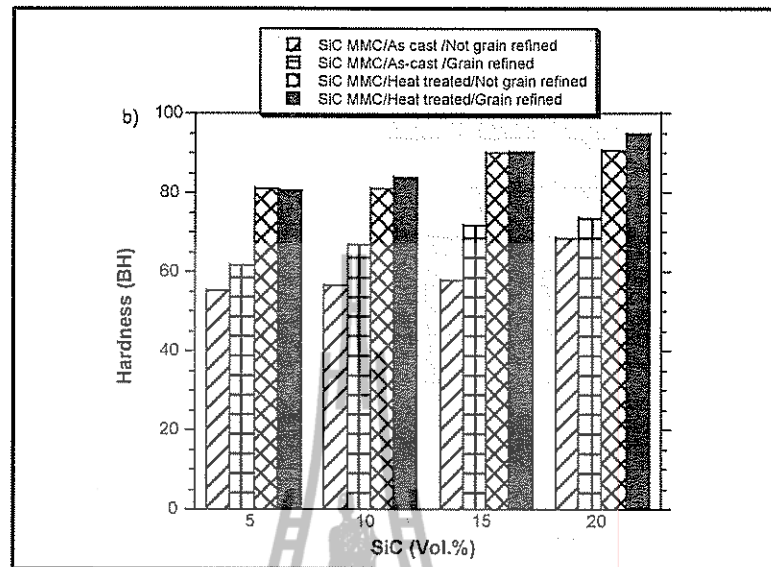
ผลการทดสอบสมบัติความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 พบว่าเมื่อปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น จะพบว่าค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์ มีค่ามากที่สุดคือประมาณ 98 HB ส่วนผลการทดสอบแรงดึงแสดงในรูปที่ 2.22 พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด เท่ากับ 275 MPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่า

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 220 MPa และ 170 MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบสมบัติความแข็งและสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์แสดงให้เห็นว่าสมบัติความแข็งนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ เพิ่มขึ้นแต่ปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมเท่านั้นจะทำให้วัสดุเชิงประกอบแสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่มีค่าสูงสุด สำหรับในการทดลองนี้คือวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

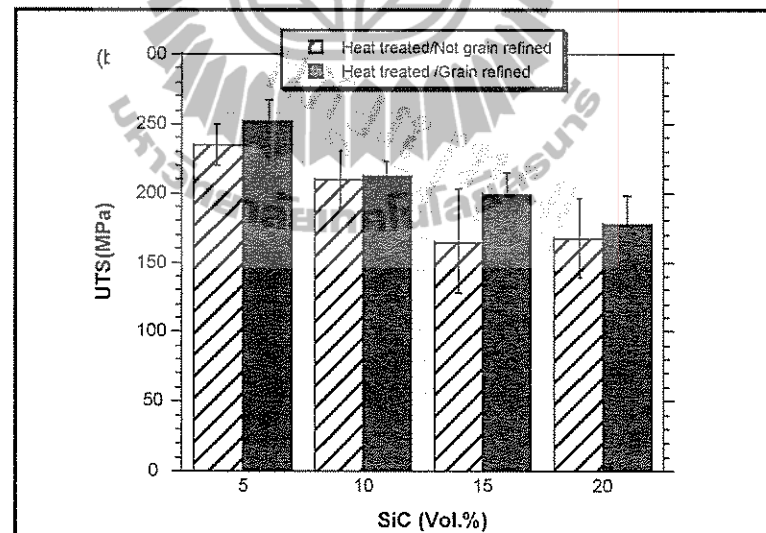
การศึกษาของ Emamy และคณะ ในปี 2008 ได้ศึกษาผลกระทบจากการเติม Al-5Ti-B ด้วยปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เกรด A356 เสริมแรงด้วยอนุภาค 2 ชนิด ได้แก่ อะลูมินาออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันคือ 43 ไมโครเมตร ในปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูป (T6) ใช้การขึ้นรูปแบบกวนผสมในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ สำหรับผลการทดลองในส่วน of วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์แสดงในรูปที่ 2.23-2.26 โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ แสดงในรูปที่ 2.23 ส่วนผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติความแข็งแสดงในรูปที่ 2.24 และผลการทดสอบสมบัติแรงดึง โดยแสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในรูปที่ 2.25 และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวแสดงในรูปที่ 2.26 ตามลำดับ



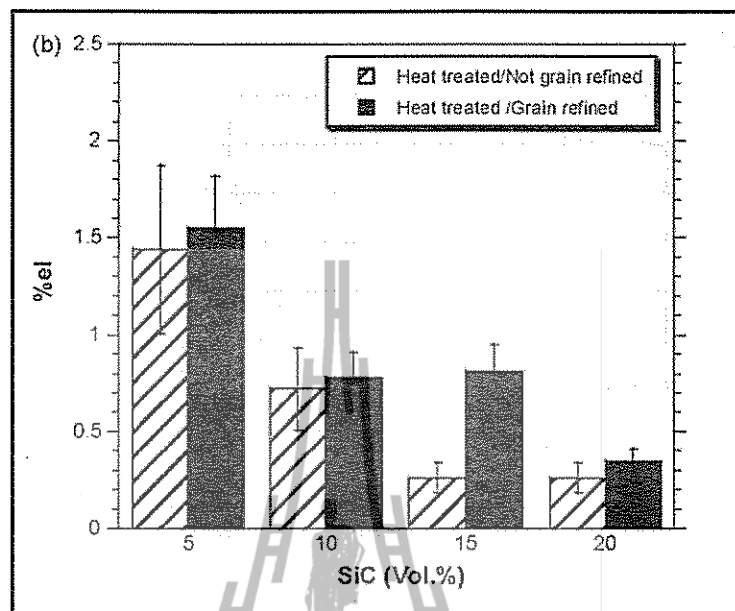
รูปที่ 2.23 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Emamy, et al.)



รูปที่ 2.24 แสดงผลการทดสอบสมบัติความแข็ง (Emamy, et al.)



รูปที่ 2.25 แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ (Emamy, et al.)



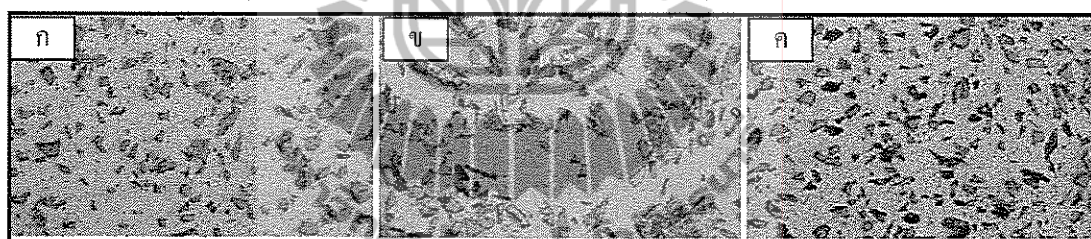
รูปที่ 2.26 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Emamy, et al.)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนพบว่า ผลจากการเติม Al-5Ti-B จำนวน 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อลดขนาดเกรนนั้นไม่ได้มีผลที่ชัดเจนว่าช่วยให้ปริมาณรูพรุนเกิดขึ้นมากหรือน้อยในโครงสร้างจุลภาค แต่จากการทดสอบความแข็งแรงแบบบรินเนล พบว่าเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นแต่ผลกลับเป็นตรงกันข้ามสำหรับผลการทดสอบแรงดึง โดยทั้งค่าความแข็งแรงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของวัสดุเชิงประกอบลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการเสริมแรง แต่อย่างไรก็ดีผลจากการลดขนาดเกรน การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) ต่างก็เป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลทั้งสมบัติความแข็งแรงและสมบัติแรงดึง

การทดลองของ Ali Kalkanli และ Sencer Yilmaz (2008) เป็นการศึกษาสมบัติความแข็งแรงและสมบัติแรงดึงของอะลูมิเนียม 7075 ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 15 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) ที่มีต่อสมบัติแรงดึง สำหรับซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการเสริมแรงมีขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร และใช้การขึ้นรูปแบบใช้แรงดันในแนวตั้ง (Vertical Pressure Casting) โดยใช้ Squeeze Casting Machine จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 2.27 พบว่าวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเงื่อนไขการทดลองที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ดี



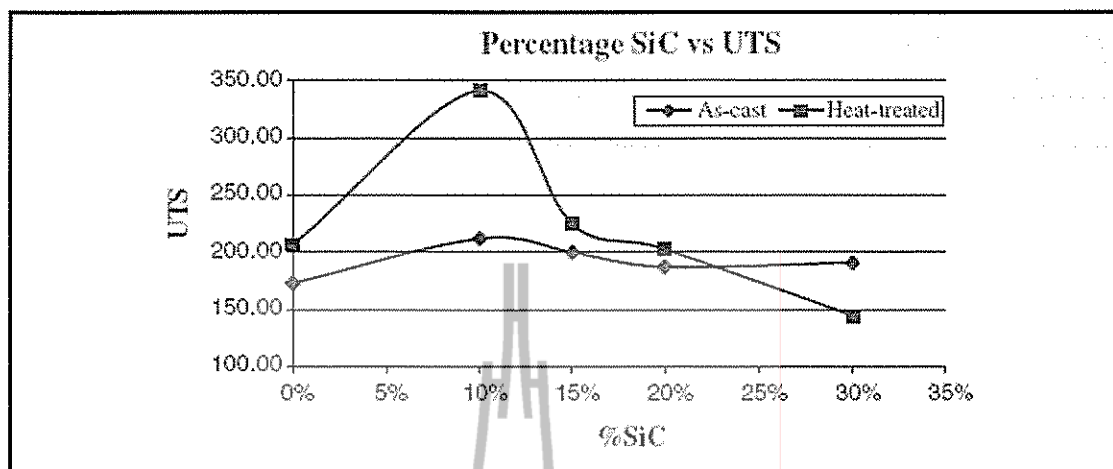
ของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค ส่วนผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ แสดงในตารางที่ 2.7 พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ และผลการทดสอบแรงดึงแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่ามากที่สุด คือ 210 MPa และหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) แล้วค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 330 MPa แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อไปอีก ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบก็มีแนวโน้มลดลง จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าการผลิตวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์จะเป็นเงื่อนไขที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ดีของซิลิคอนคาร์ไบด์จึงเป็นผลดีต่อสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบและการใช้กระบวนการทางความร้อนทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.27 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 200 เท่า ของวัสดุเชิงประกอบด้วยพื้นอะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ก) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ข) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค) 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Ali Kalkanli and Sencer Yilmaz)

ตารางที่ 2.7 แสดงผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ (Ali Kalkanli and Sencer Yilmaz)

Measurement no.	1	2	3	4	5	6	7	Average
Al-0% SiC	131	131	131	136	136	132	135	133
Al-10% SiC	139	138	138	138	136	138	137	138
Al-15% SiC	134	138	153	154	153	154	146	147
Al-20% SiC	155	163	166	155	160	157	160	159
Al-30% SiC	172	205	175	185	182	192	206	188



รูปที่ 2.28 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ (Ali Kalkanli and Sencer Yilmaz)

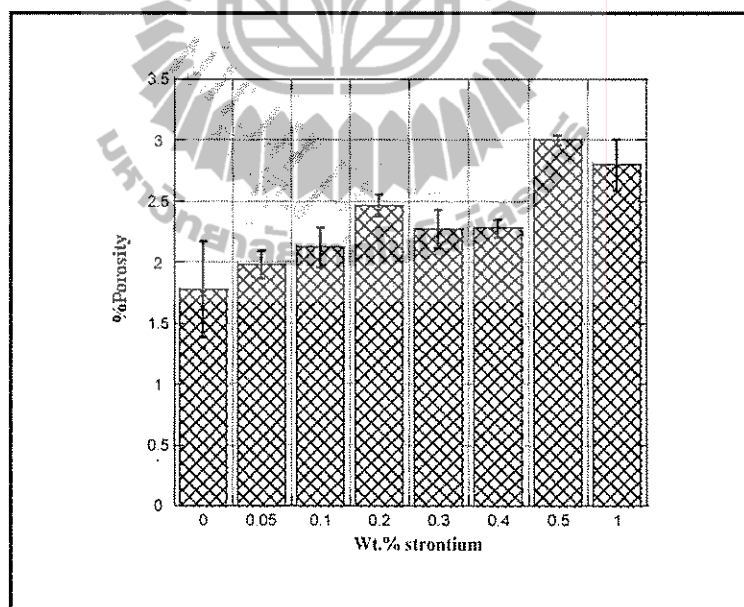
#### 2.10.4 ผลกระทบจากการเติมธาตุผสมเพื่อปรับปรุงโครงสร้างก่อนเทลงแบบหล่อ

##### 2.10.4.1 ผลกระทบของการเติมสารปรับปรุงทรงซิลิคอนยูเทคติก

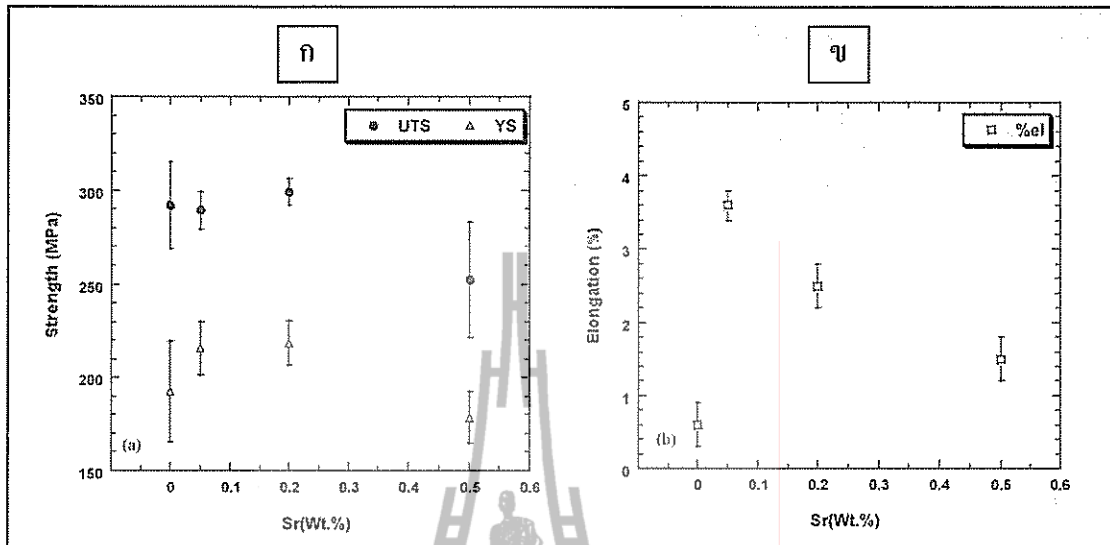
การศึกษาของ Lashgari, Emamy, Razaghianb และ Najimia ในปี 2009 เป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณ Sr ต่อโครงสร้างจุลภาค ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นและสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรด A356 เสริมแรงด้วยอนุภาค โบรอนคาร์ไบด์ ( $B_4C$ ) ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย  $65 \mu m$ . ด้วยปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและใช้วิธีขึ้นรูปด้วยการผสม โดยขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการให้ความร้อน  $B_4C$  ที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำมาผสมในโลหะอะลูมิเนียม A356 ที่หลอม ณ อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน กวนผสมด้วยความเร็ว 720 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ในการเตรียมแท่งโลหะวัสดุเชิงประกอบ หลังจากนั้นนำแท่งโลหะเชิงประกอบที่ได้มาหลอมอีกครั้งด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำโลหะหลัก (Al-10%Sr) ที่มีปริมาณของ Sr แตกต่างกัน (ปริมาณ Sr ที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.05 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์) ผสมกับอะลูมิเนียมและเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส ลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอก (รัศมี 30 มิลลิเมตร และ สูง 60 มิลลิเมตร) หลังจากนั้นนำส่วนล่างของชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค สำหรับการทดสอบแรงดึงจะนำส่วนของชิ้นงานหล่อที่มีขนาดมาตรฐานสำหรับทดสอบแรงดึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 36 มิลลิเมตร ระยะเกจ 30 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของ ASTM B108-03a และ ASTM B557-02a นำชิ้นงานมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังจากการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6: อุณหภูมิอบละลาย 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทำ

ให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำอุ่น และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง) โดยใช้อัตราการเสีรูปร่าง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Sr ลงในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค  $B_4C$  10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรนั้น เป็นสาเหตุทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ส่วนผลการทดสอบแรงดึงแสดงในรูปที่ 2.30 พบว่าเมื่อเติม Sr 0.05 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและความแข็งแรง ณ จุดคราก แต่ที่มีความสำคัญในการเพิ่ม อัตราการยึดตัวของวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะเมื่อเติม Sr ในปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม Sr ในปริมาณสูง (0.5 เปอร์เซ็นต์) ทำให้มีสารประกอบเชิงโลหะ ( $Al_2Si_2S$ ) เกิดขึ้นระหว่างเฟสโลหะพื้นและเฟสเสริมแรง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ข้อสรุปถึงปริมาณของ Sr 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการทำโมดิฟิเคชันวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรด A 356 เสริมแรงด้วยอนุภาค  $B_4C$  ด้วยปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

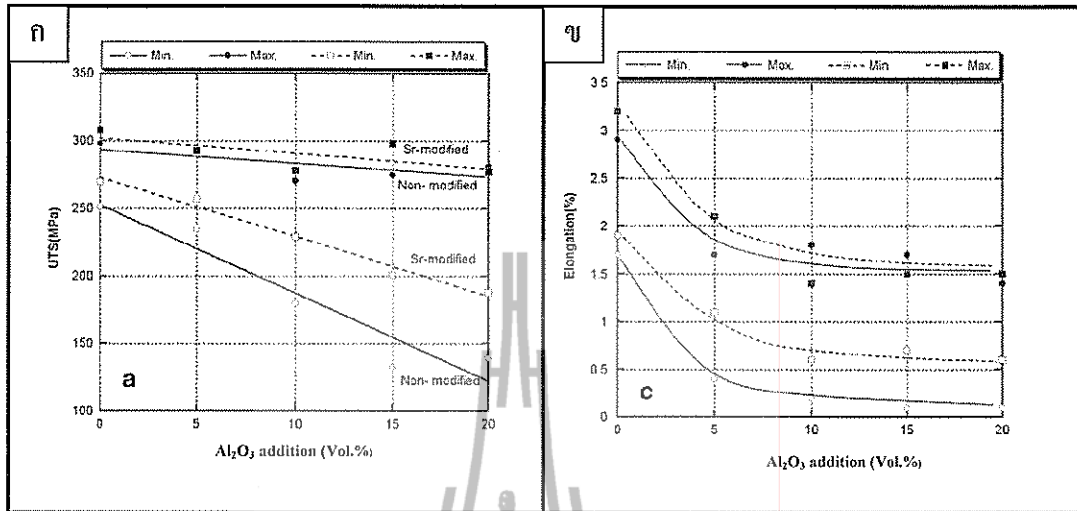


รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบกับปริมาณของ สตรอนเทียม (Lashgari, et al., 2009)

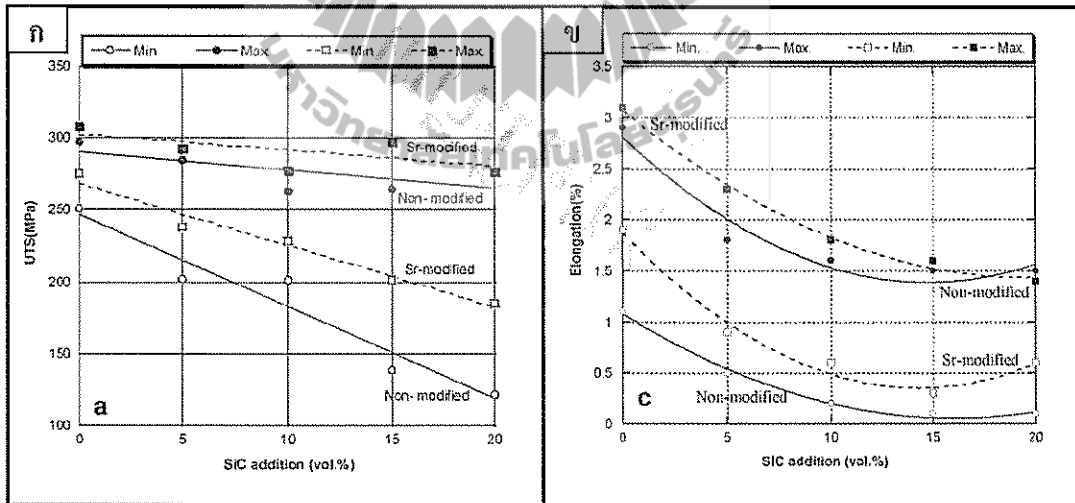


รูปที่ 2.30 แสดงผลการทดสอบแรงดึง ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดกับปริมาณของ Sr ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง ณ จุดคราก กับปริมาณของ Sr (Lashgari, et al., 2009)

การศึกษาของ Razaghiana, Emamy, Najimib and Seyed (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของ Sr ต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด A 357 เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และอนุภาคอะลูมินาออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ที่มีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 40 ไมโครเมตร ด้วยปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม ในขั้นตอนของการเตรียมแท่งวัสดุเชิงประกอบภายใต้ความดันบรรยากาศก่อน นำซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ส่วน  $Al_2O_3$  ผ่านการให้ความร้อนที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มานำไปเติมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมและทำการกวนผสม หลังจากนั้นนำแท่งโลหะเชิงประกอบที่นำมาให้ความร้อนอีกครั้งในเตาหลอมซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส โดยเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส โดยปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน T6 (อุณหภูมิอบละลาย 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ลดความร้อนอย่างรวดเร็วในน้ำอุ่นและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง) ก่อนนำไปทดสอบแรงดึง



รูปที่ 2.31 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เติม Sr 0.03 เปอร์เซ็นต์ และไม่เติม Sr โดยน้ำหนัก ก) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ข) ค่าอัตราส่วนการยืดตัว (Razaghiana, et al., 2009)



รูปที่ 2.32 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย SiC เติม Sr 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่เติม Sr ก) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ข) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Razaghiana, et al.)

จากผลการทดลองสรุปว่าปริมาณที่เหมาะสมของ Sr สำหรับการทำให้โมดิไฟเคชันของอะลูมิเนียมเกรด A357 คือ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่ง Sr ในปริมาณดังกล่าวช่วยเพิ่มสมบัติแรงดึงและอัตราการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และอะลูมินาออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 และ 2.32 ตามลำดับ เนื่องจากการเติม Sr เป็นการปรับปรุงรูปทรงสัณฐานของผลึกซิลิคอนในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม และรายงานการวิจัยแสดงให้เห็นว่า Sr เป็นสาเหตุให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะบางอย่างเกิดขึ้นรอบ ๆ อนุภาคที่เสริมแรง เช่น  $Al_2Si_2Sr$  ทั้งในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม A356 ที่เสริมแรงด้วย SiC และ  $Al_2O_3$  โดยต้องใช้ Sr ในปริมาณน้อยเช่น 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรสารประกอบที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะช่วยเพิ่มสมบัติการเปื่อยระหว่างอนุภาคและน้ำโลหะ

การศึกษาของ Garcia-Hinojosa, Gonzalez, Juárez และ Surappa, (2004) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเติม Sr ในปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่ 0.01 0.05 0.10 0.20 0.30 0.40 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ต่อดัชนีของโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการทดลองนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เสริมแรงมีขนาดเฉลี่ย 38 ไมโครเมตร การผลิตวัสดุเชิงประกอบใช้วิธีการกวนผสมก่อนที่จะเทลงในแบบหล่อโลหะซึ่งเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. และความสูง 15 ซม. ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเพื่อคำนวณหา Dendritic arm spacing (DAS) และความหนาแน่นของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างจุลภาค แสดงในรูปที่ 2.33

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าปริมาณ Sr ระหว่าง 0.05 และ 0.10 เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการทำให้โมดิไฟเคชันสำหรับวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยพบเฟสของยูเทคติกซิลิคอนที่มีขนาดเล็กละเอียดในโครงสร้างจุลภาคและยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเปื่อยระหว่างน้ำโลหะและอนุภาค จึงทำให้มีปริมาณ ซิลิคอนคาร์ไบด์ กระจายอยู่อย่างหนาแน่นในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม (250-265 อนุภาค/ตารางเมตร) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ Sr มากขึ้น ตั้งแต่ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดการ โมดิไฟเคชันที่มากเกินไปและทำให้มีการตกตะกอนของสารประกอบสตรอนเทียม ( $SrAl_2Si_2$ ) เกิดขึ้นบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างโลหะพื้นอะลูมิเนียมและอนุภาคเซรามิกซึ่งเป็นผลเสียต่อสมบัติเชิงกล และทำให้พบซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างน้อยลง

Average DAS values of monolithic alloy and composites with different Sr levels										
Samples	Monolithic alloy			Cast composites (wt.% Sr)						
	Non-modified	Modified	Non-modified	0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
DAS ( $\mu\text{m}$ )	18	19	15.5	17	18	18.5	17.5	16	15.5	17

**ก) Dendritic arm spacing (DAS)**

Effect of Sr concentration (wt.%) on SiC particle density (particles/ $\text{mm}^2$ )								
	wt.% Sr							
	No Sr	0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
Particle density	80	120	250	265	190	170	130	95

**ข) ความหนาแน่นของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ในโครงสร้างจุลภาค**

รูปที่ 2.33 แสดงผลการทดลอง ก) Dendritic arm spacing: DAS และ ข) ความหนาแน่นของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ใน โครงสร้างจุลภาค (Garcia-Hinojosa, et al., 2004)

#### 2.10.4.2 ผลของการเติมสารลดขนาดเกรน

การศึกษาของ Garcia-Hinojosa, González, Juárez และ Surracap ในปี 2004 ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากปริมาณของ Ti ในสารลดขนาดเกรน 3 ชนิด ได้แก่เกลือ  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  (ใช้ปริมาณ Ti ระหว่าง 0.15-0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)  $\text{Al-6Ti}$  (ใช้ปริมาณ Ti ระหว่าง 0.15-0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ  $\text{Al-5Ti-B}$  (ใช้ปริมาณ Ti ระหว่าง 0.05-0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ต่อประสิทธิภาพของการลดขนาดเกรนของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม-ซิลิคอน 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการกวนผสม (Vortex method) ในการทดลองเริ่มจากนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาหลอมที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส การเติมสารลดขนาดเกรนที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียสและทำการกำจัดก๊าซด้วยก๊าซอาร์กอนก่อนเทใส่แบบหล่อที่ทำจากเหล็กรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. ยาว 20 ซม. ทำการวิเคราะห์ขนาดของเกรนตามมาตรฐาน ASTM E112

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เกลือ  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  เป็นสารลดขนาดเกรนนั้นจะสามารถลดขนาดเกรนอะลูมิเนียมปฐมภูมิได้แต่พบว่าการแยกตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลว ส่วนการใช้  $\text{Al-5Ti-B}$  หรือ  $\text{Al-6Ti}$  เป็นสารลดขนาดเกรน แสดงให้เห็นว่า มีประสิทธิภาพลดขนาดเกรนของอะลูมิเนียมปฐมภูมิและยังทำให้ SiC กระจายตัวได้ดีในโครงสร้างจุลภาค ดังนั้นจากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าเกลือ  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการลดขนาดเกรนของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอน

คาร์ไบด์ ส่วน Al-5Ti-B และ Al-6Ti เป็นสารลดขนาดเกรนที่ควรใช้ในการลดขนาดเกรนของวัสดุเชิงประกอบ

#### 2.10.4.3 ผลกระทบจากการเติม Mg

การเติม Mg ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวก่อนที่จะเติมซิลิคอนคาร์ไบด์มีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อความสามารถในการเปียกระหว่างน้ำโลหะอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยการลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมด้วยปฏิกิริยาเคมี Mg เป็นธาตุผสมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ เนื่องจากทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถเข้าไปผสมกับโลหะพื้นอะลูมิเนียมได้มากขึ้นในโครงสร้างจุลภาค (Hashim, et al., 2001) ตามได้กล่าวรายละเอียดไว้ในข้อที่ 2.1.1



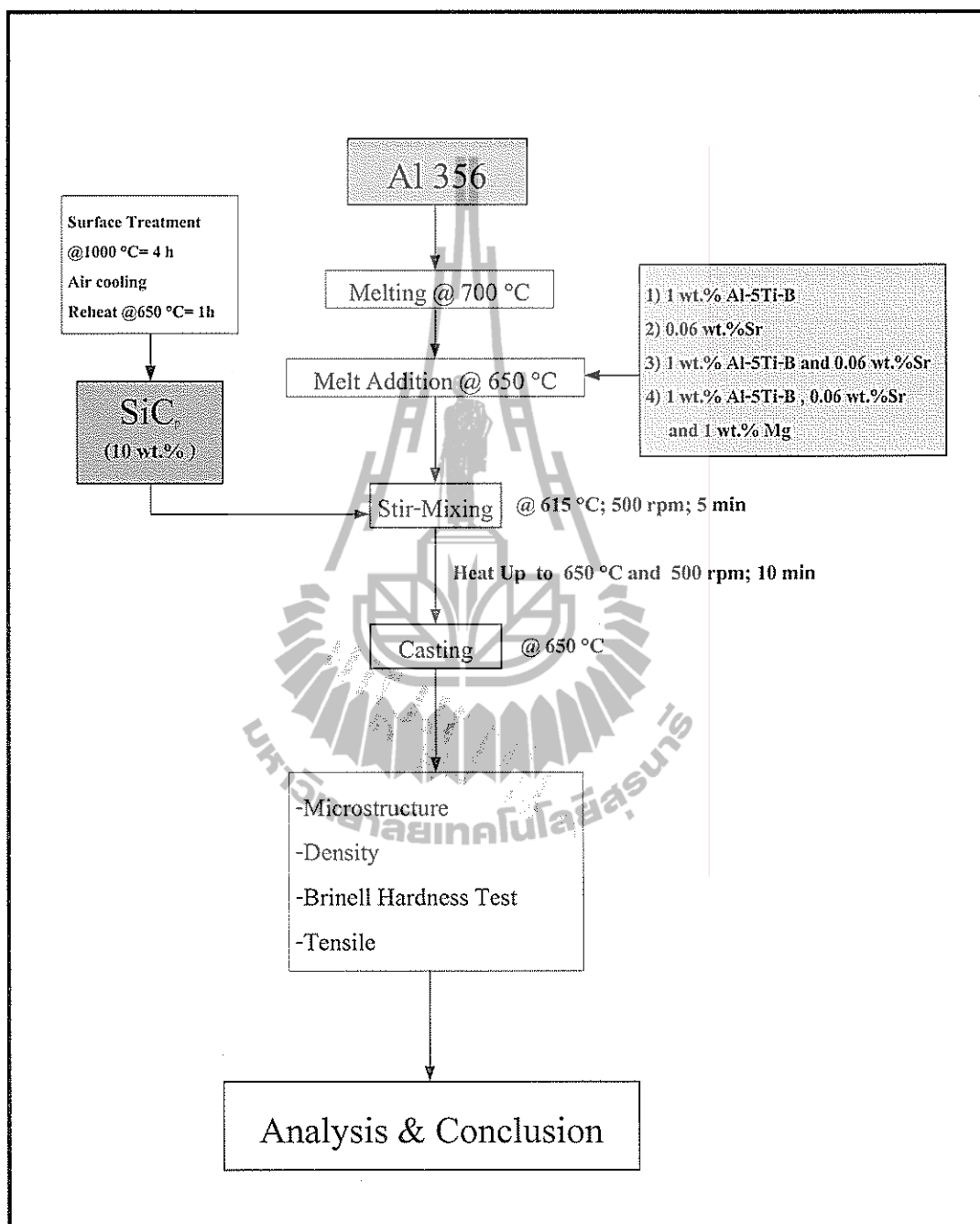


## บทที่ 3

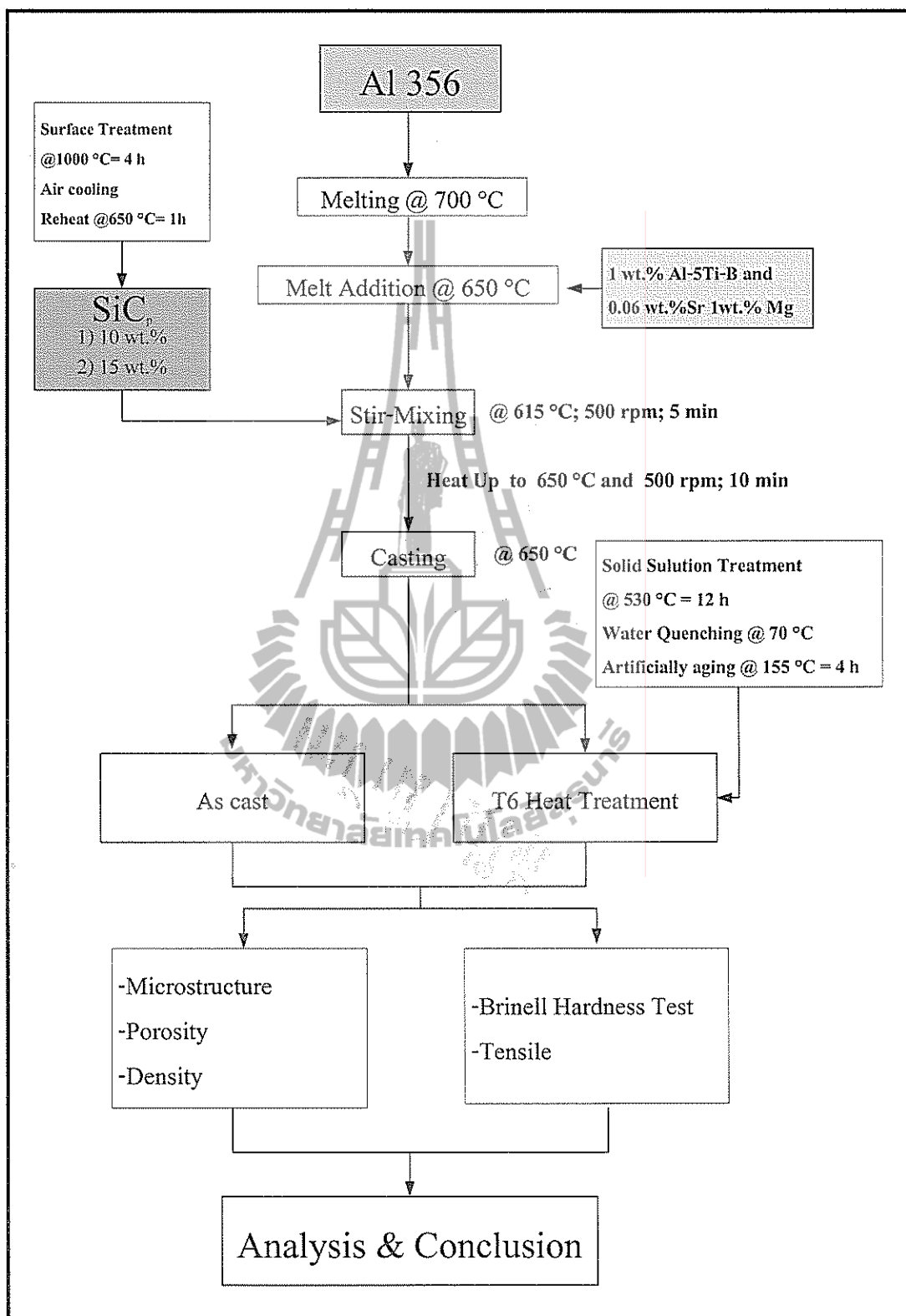
### วัสดุและวิธีการทดลอง

#### 3.1 บทนำ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม โดยได้แบ่งขั้นตอนการทำงานเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย เตาหลอม ชุดอุปกรณ์ในการกวนผสม เบ้าหลอมน้ำโลหะอะลูมิเนียม แบบหล่อและใบพัดที่ใช้ในการกวนผสม โดยรายละเอียดของวิธีการสร้างเครื่องมือแต่ละชนิด จะแสดงในข้อที่ 3.2 ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานตามแผนภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสุดท้ายขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานตามแผนภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื่นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

### 3.2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. มอเตอร์ไฟฟ้า
2. ขดลวดความต้านทานไฟฟ้า
3. เทอร์โมคัพเปิด
4. อิฐทนไฟ ดินเผา (ฉนวนกันความร้อน)
5. เหล็กทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร
6. ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว
7. เหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
8. สแตนเลส เกรด 304
9. ชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว
10. น้ำเชื่อม
11. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer Counter)
12. เครื่องกลึงโลหะ
13. เครื่องตัดโลหะ
14. ลวดเชื่อม
15. เครื่องเชื่อมไฟฟ้า
16. เครื่องเชื่อมอาร์กอน (Tungsten Inert gas)
17. เซอร์โคเนียม

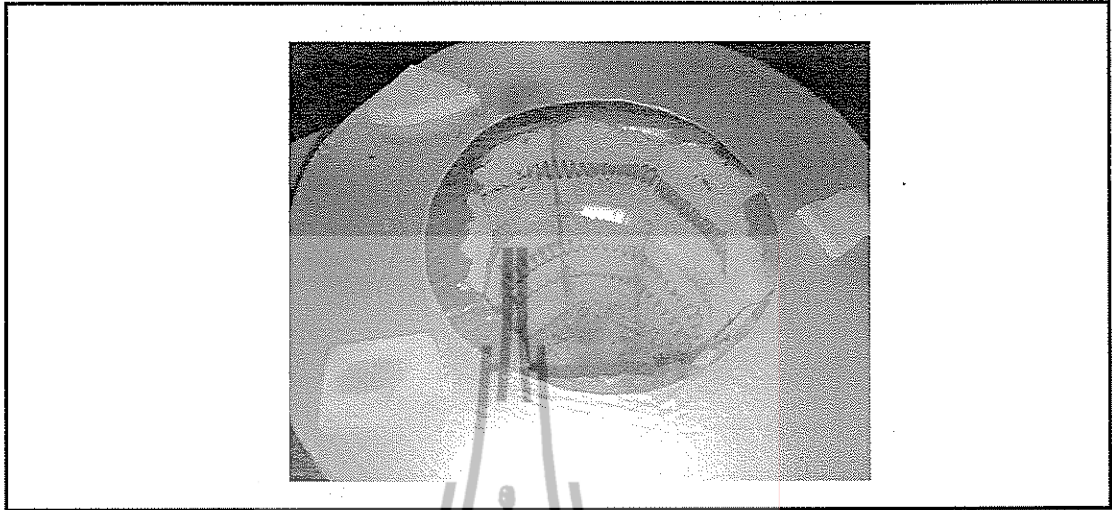
#### 3.2.2 วิธีการสร้างอุปกรณ์กวนผสม

##### 3.2.2.1 ชุดอุปกรณ์เตาหลอมน้ำโลหะและชุดควบคุมความเร็วในการกวนผสม

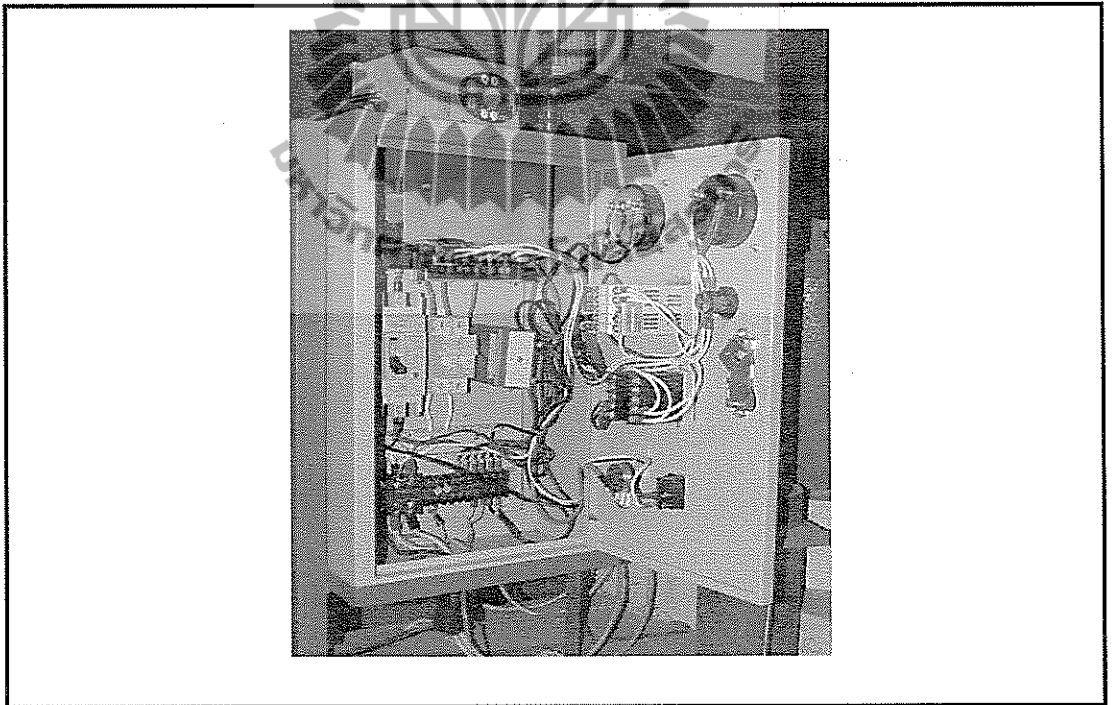
สำหรับการทดลองนี้ได้สร้าง เตาหลอมน้ำโลหะ โดยใช้เหล็กแผ่นมาเชื่อมประกอบทำเป็นเตารูปทรงกระบอก ซึ่งภายในจะบรรจุด้วยอิฐทนไฟและดินเผาและนำเส้นลวดความต้านทานมาขดไว้ภายใน แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยจะควบคุมความร้อนด้วยชุดควบคุมไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.4

อุปกรณ์ควบคุมการกวนผสม 3 ประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้า อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งใช้ควบคุมความเร็วของใบพัดที่ใช้กวนผสมดังแสดงในรูปที่ 3.5 และใบพัดที่ใช้กวนผสมซึ่งทำจาก สแตนเลส 304 เป็นใบพัดชนิด  $45^{\circ}$  Flat blade disk turbine โดยแบบของใบพัดแสดงดังรูปที่ 3.6

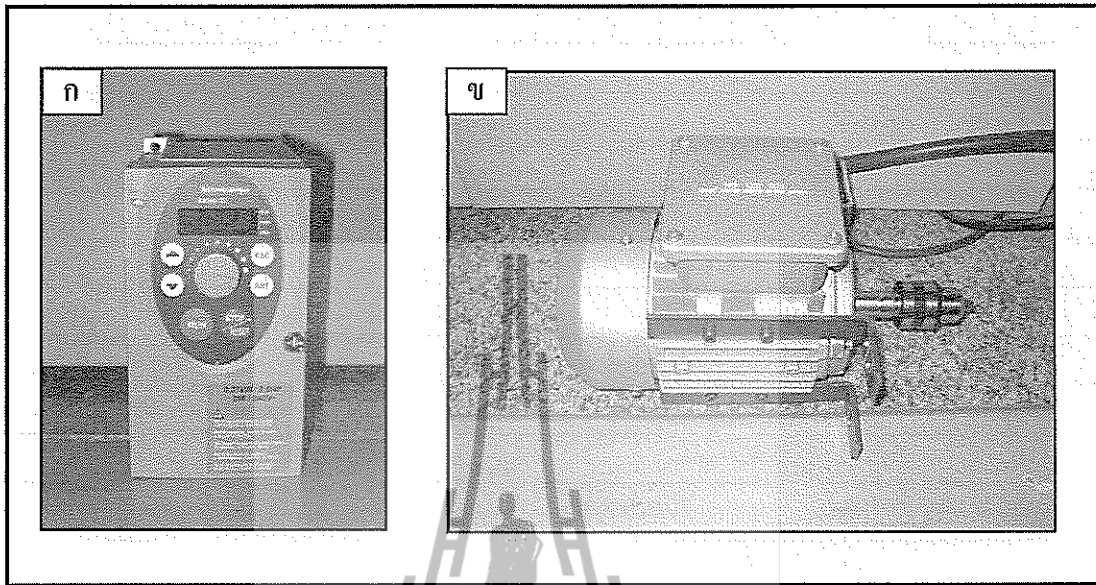
หลังจากนั้นนำอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นมาในแต่ละส่วนประกอบกันและติดตั้งเทอร์โมคัพเปิด จะได้ชุดอุปกรณ์เพื่อใช้ในการหลอมโลหะและกวนผสม ดังแสดงในรูปที่ 3.7



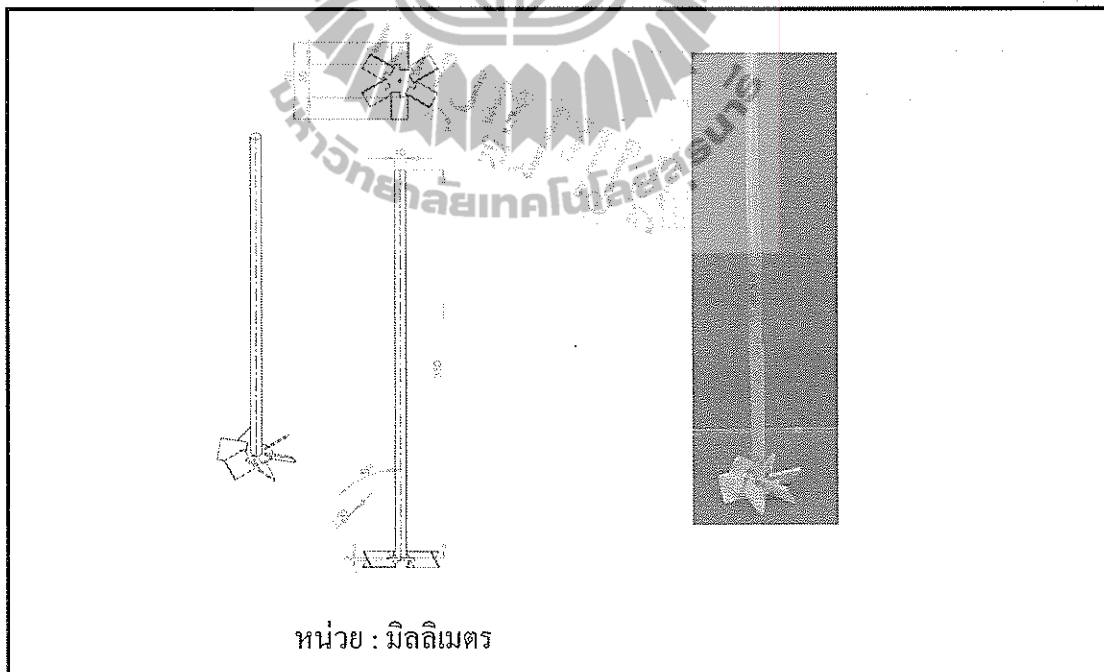
รูปที่ 3.3 แสดงเตาหลอมน้ำโลหะที่ให้ความร้อนด้วยลวดความต้านทาน (Resistance Furnace)



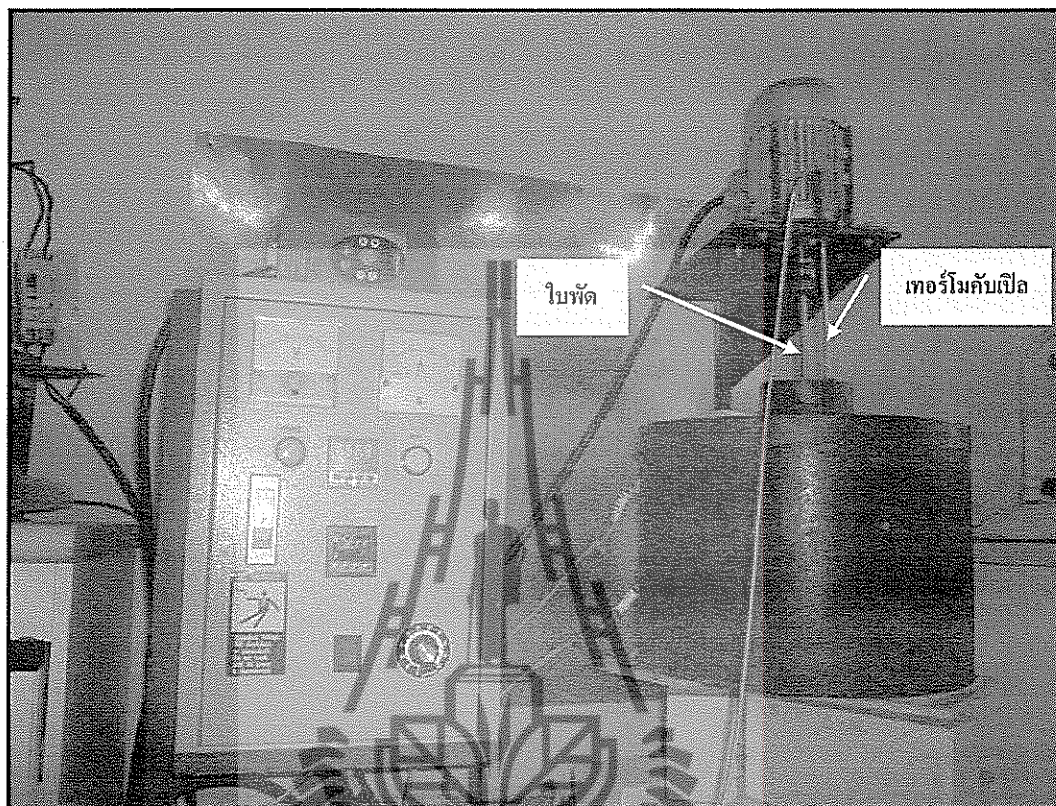
รูปที่ 3.4 แสดงตู้ควบคุมกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนแก่เตาหลอม



รูปที่ 3.5 ก) แสดงชุดควบคุมความเร็วในการกวนผสม ข) มอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.6 แสดงแบบใบพัดที่ใช้กวนผสม



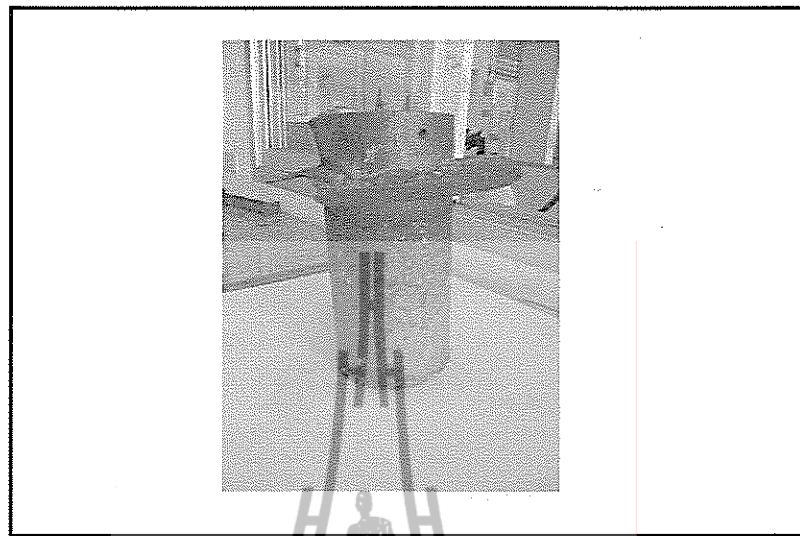
รูปที่ 3.7 แสดงการประกอบอุปกรณ์ในการหลอมโลหะและอุปกรณ์ในการกวนผสม

#### 3.2.2.2 เบ้าหลอมโลหะ

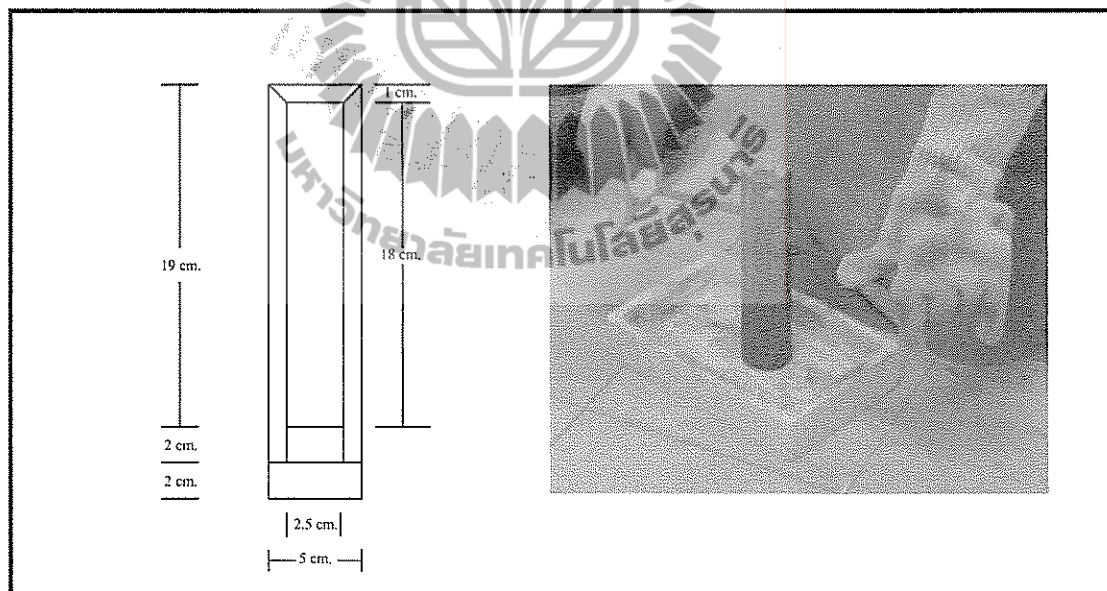
เบ้าหลอมโลหะดัดแปลงโดยใช้ท่อเหล็กกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 9 นิ้ว นำเหล็กแผ่นหนา 0.2 เซนติเมตร มาเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้าทำเป็นก้นเบ้าหลอม หลังจากนั้นนำเหล็กแผ่นหนา 0.1 เซนติเมตร มาเชื่อมประกอบกับเบ้าหลอมภายนอกสูงจากก้นเบ้าหลอม 7 นิ้ว เพื่อใช้เป็นส่วนที่วางเบ้าหลอมกับเตาหลอมโลหะ แสดงดังรูปที่ 3.8 ภายในแบบหล่อจะเคลือบด้วยเซอร์โคเนียม เพื่อลดการการแพร่ของเหล็กไปผสมกับน้ำโลหะอะลูมิเนียม

#### 3.2.2.3 แบบหล่อถาวรทำจากเหล็ก

แบบหล่อถาวรทำจากเหล็ก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 25 มิลลิเมตร และมีความสูง 230 มิลลิเมตร โดยรายละเอียดของแบบหล่อแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แสดงแม่หล่อโลหะ



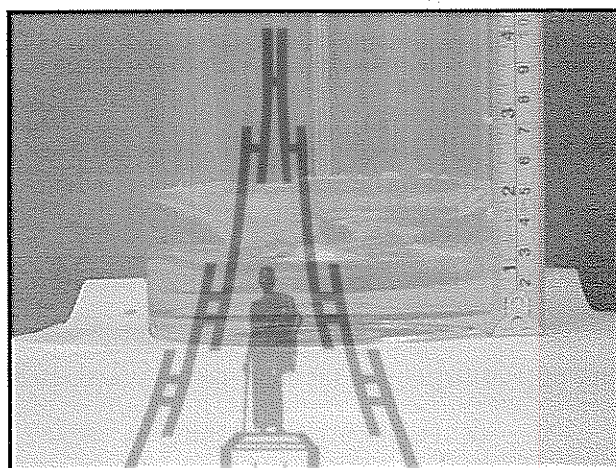
รูปที่ 3.9 แสดงแบบหล่อถาวร

#### 3.2.2.4 การทดสอบความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม

การทดสอบความเร็วของมอเตอร์ที่ควบคุมความเร็วของใบพัดที่ใช้ในการกวนผสมสำหรับการวิจัยนี้ คือ 500 รอบต่อนาที โดยการทดลองกวนผสมในน้ำหวานแสดงในรูปที่ 3.10 หลังจากนั้นวัดความเร็วจริงด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer Counter) เปรียบเทียบกับความเร็วที่ปรากฏบนหน้าจอชุดควบคุม นำข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.1 มาสร้างกราฟ



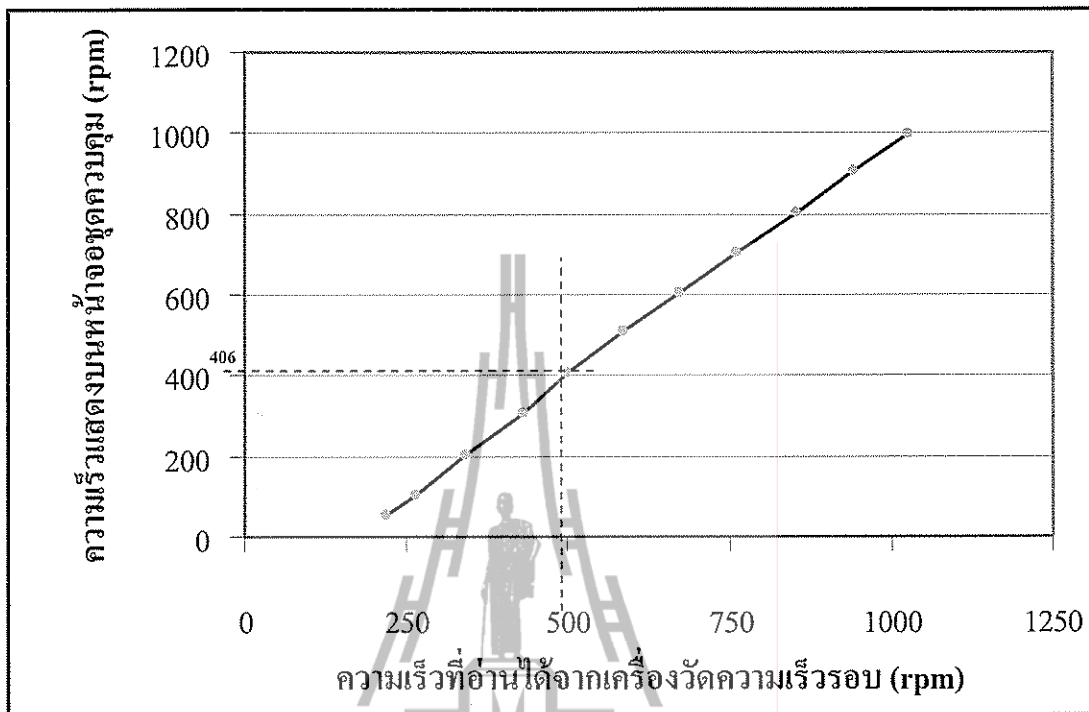
ความสัมพันธ์ ระหว่างความเร็วที่แสดงบนหน้าจอชุดควบคุมความเร็วกับความเร็วที่วัดได้จริงจาก เครื่องวัดความเร็วรอบ ในรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่าถ้าต้องการความเร็วในการกวนผสม 500 รอบ ต่อนาที ต้องปรับความเร็วที่หน้าจอชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ไว้ที่ 406 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.10 แสดงการกวนผสมที่ทดลองปั่นในน้ำเชื่อม

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดลองหาความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม

ความเร็วที่หน้าจอชุดควบคุม (รอบต่อนาที)	ความเร็วที่วัดได้จริง (รอบต่อนาที)	ความแตกต่าง (รอบต่อนาที)
54	219	165
105	264	159
204	343	139
306	432	126
405	499	94
507	587	80
606	674	68
705	761	56
804	854	50
906	941	35
999	1027	28



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่วัดได้และความเร็วที่อ่านได้จากหน้าจอชุดควบคุม

### 3.3 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์ และทดสอบสมบัติทั้งหมดมีดังนี้

1. เครื่องตัดโลหะแผ่นด้วยแรงเฉือน
2. เครื่องกลึง
3. เครื่องตัดโลหะแผ่น EDM wire cut
4. เครื่องซั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
5. เครื่องซั่งดิจิตอล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
6. ชุดหนัง ถุงมือ หน้ากาก กันความร้อน
7. เตาลอมอะลูมิเนียม ไฟฟ้าที่ให้ความร้อนจากหลอดความต้านทาน
8. ชุดอุปกรณ์ในการกวนผสม
9. กรวยสแตนเลส
10. เครื่องมือเตรียมผิวชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

11. เครื่องทดสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะขึ้นชื่อ BRID
12. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)
13. เครื่องวัดค่าความแข็งแบบ บริเนล
14. เครื่องทดสอบแรงดึงขึ้นชื่อ Instron ขนาด 100 kN, 200 kN
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
16. Extensometer

### 3.3.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

3.3.2.1 อะลูมิเนียม (Aluminium) สูตรเคมี คือ Al ใช้เกรด 356 ซึ่งเป็นโลหะผสม อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม เป็นอะลูมิเนียมที่มีสมบัติการหล่อที่ดี สำหรับอะลูมิเนียม เกรด 356 ที่ใช้ในการวิจัย มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ใช้ในการวิจัย

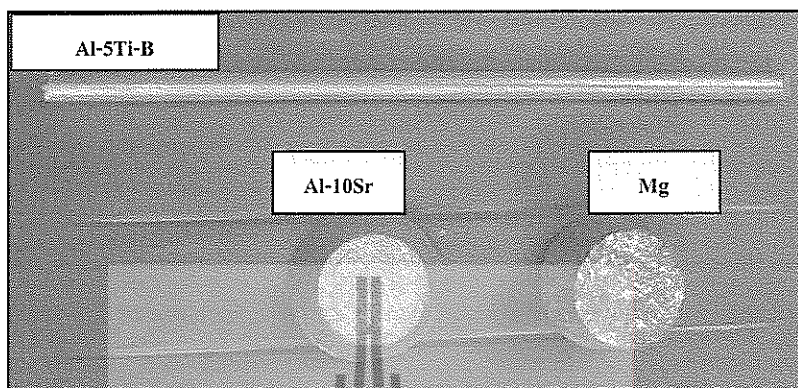
Condition No.1 Aluminium 356									
Si	Cu	Fe	Zn	Ni	Mg	Cr	Mn	Pb	Sn
7.430	0.024	0.433	0.013	0.108	0.404	0.048	0.010	0.660	0.076

3.3.2.2 ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) มีสูตรทางเคมีคือ SiC ที่ใช้เป็นอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide Particulates) จะใช้สัญลักษณ์ คือ SiC<sub>p</sub> จัดจำหน่ายโดยบริษัท เอส.เอ็ม.เคมีคอลส์พลาย จำกัด เป็นอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 37 ไมโครเมตร มีขนาดเฉลี่ย 10.5 ไมโครเมตร จำนวนไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

3.3.2.3 สารลดขนาดเกรน (Grain refiner) สารลดขนาดเกรนที่ใช้อยู่ในรูปของ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ไทเทเนียม-โบรอน โดยมี ไทเทเนียมผสม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ โบรอน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ คือ Al-5Ti-1B สำหรับโลหะผสม อะลูมิเนียม-ไทเทเนียม-โบรอน ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดแท่งทรงกระบอก มีลักษณะสีเงิน

3.3.2.4 สารปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของยูเทคติกซิลิคอน (Eutectic Modifier) สำหรับการวิจัยนี้ใช้ สตรอนเทียม โดยมีสูตรทางเคมีคือ Sr ที่ใช้ จะเป็นโลหะอะลูมิเนียมผสม สตรอนเทียม 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้สัญลักษณ์ Al-10Sr จะมีลักษณะสีเงินมันวาว

3.3.2.5 แมกนีเซียม มีสูตรทางเคมีคือ Mg ที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะเป็น ก้อนโลหะสีเงินมีผิวมันวาว ใช้สำหรับเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างอะลูมิเนียมขณะ หลอมเหลว และอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.12 แสดงสารลดขนาดเกรน (Al-5Ti-B) สารปรับปรุงทรงสัณฐานยูเทคติกซิลิคอน (Al-10Sr) และแมกนีเซียม (Mg)

### 3.3.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นศึกษาผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการเติมธาตุผสมที่มีความแตกต่างกัน 4 เงื่อนไขการทดลอง โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

เงื่อนไขการทดลองที่	การปรับปรุงสมบัติเชิงกล			
	1 wt.% Mg	1 wt. %Al-5Ti-B	0.6 wt.%Sr	10 wt.% SiC <sub>p</sub>
1	×	×	✓	✓
2	×	✓	✓	✓
3	×	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓

### 3.3.4 การหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน

3.3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนนำไปผสมกับอะลูมิเนียม โดยให้ความร้อนกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

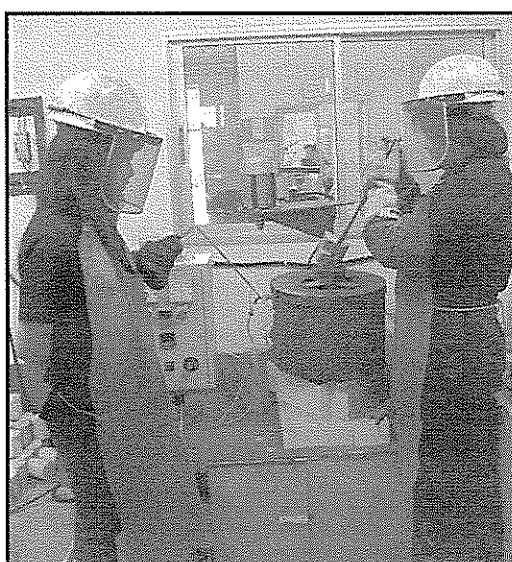
หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศและนำไปให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนการกวนผสม

3.3.4.2 ขั้นตอนการหลอมอะลูมิเนียม โดยเริ่มจากเปิดเตาไฟฟ้าที่ให้ความร้อน ด้วยเคลวดความต้านทาน จนกระทั่งมีอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อให้ความร้อนแก่เบ้าหลอม เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำอะลูมิเนียมที่ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ มีขนาดประมาณ 800 กรัม ใส่ในเบ้า หลอมโลหะ จนกระทั่งอะลูมิเนียมหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

3.3.4.3 ขั้นตอนการเติมธาตุผสมเพื่อปรับปรุงโครงสร้างอะลูมิเนียมก่อนเทลงใน แบบหล่อ โดยนำ Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เติม ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวขณะที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิของน้ำโลหะ อะลูมิเนียมหลอมเหลวให้มีอุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส

3.3.4.4 ขั้นตอนการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในน้ำ โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส และกวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ 650 องศาเซลเซียส พร้อม กับการกวนผสมความเร็วคงที่อย่างต่อเนื่องอีก 10 นาที

3.3.4.5 ขั้นตอนการเทหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยนำวัสดุเชิงประกอบขณะหลอมเหลว ที่มีอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เทใส่แบบหล่อโลหะรูปทรงกระบอก หมายเลขที่ 1 และหมายเลขที่ 2 ตามลำดับ



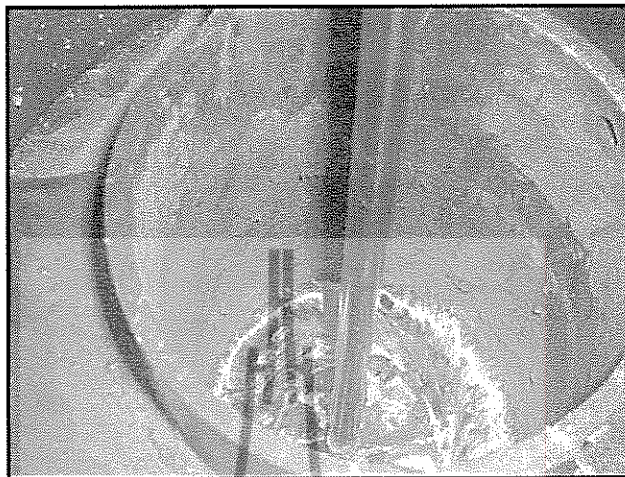
รูปที่ 3.13 แสดงการนำอะลูมิเนียมใส่ลงในเบ้าหลอมโลหะ



รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการเติม Sr Al-5Ti-B และ Mg ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนการเติม  $\text{SiC}_p$  ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.16 แสดงการกวนเพื่อผสมซิลิคอนคาร์ไบด์กับน้ำโลหะอะลูมิเนียมก่อนเทลงแบบหล่อ



รูปที่ 3.17 แสดงขั้นตอนการเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อถาวร

### 3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

#### 3.3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานหล่อจะถูกตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Carl Zeiss โดยมีการเตรียมผิวชิ้นงาน เริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 180 400 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 9 ไมโครเมตร 3 ไมโครเมตร และ 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ด้วยกำลังขยาย 5 เท่า 10 เท่า 20 เท่า และ 100 เท่า

#### 3.3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณเฟส

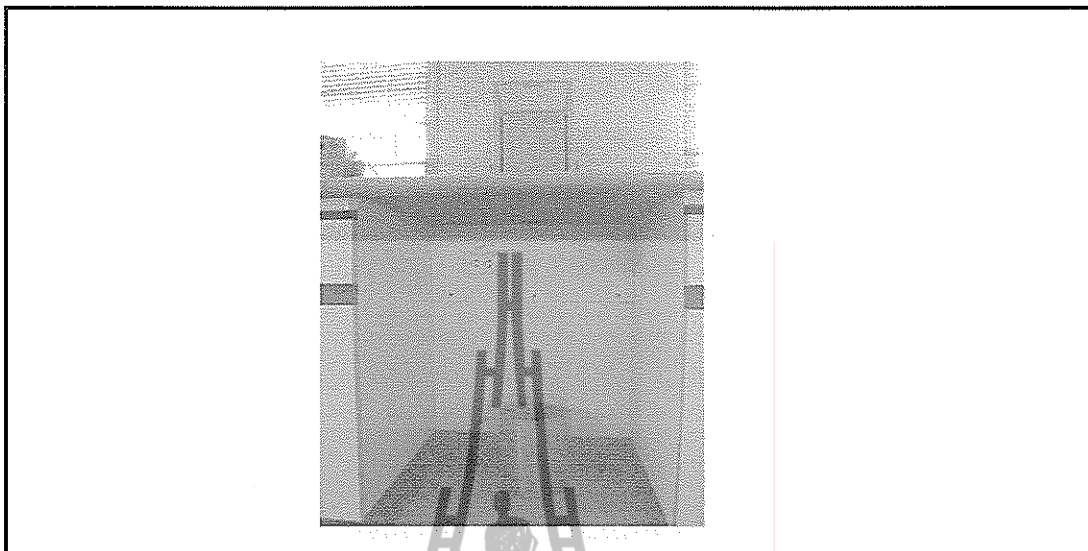
การวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่อนุภาค เฟสพื้นอะลูมิเนียม และรูพรุนบนภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค ของชิ้นงานหล่อ โดยนำภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 10 เท่า จำนวน 10 รูป ต่อ ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ I-mage-J เพื่อหาร้อยละของพื้นที่อนุภาค รูพรุน และพื้นที่ของเฟสพื้นโลหะอะลูมิเนียม ที่ปรากฏบนภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคและนำมาหาค่าเฉลี่ย

### 3.3.6 การตรวจสอบค่าความหนาแน่น

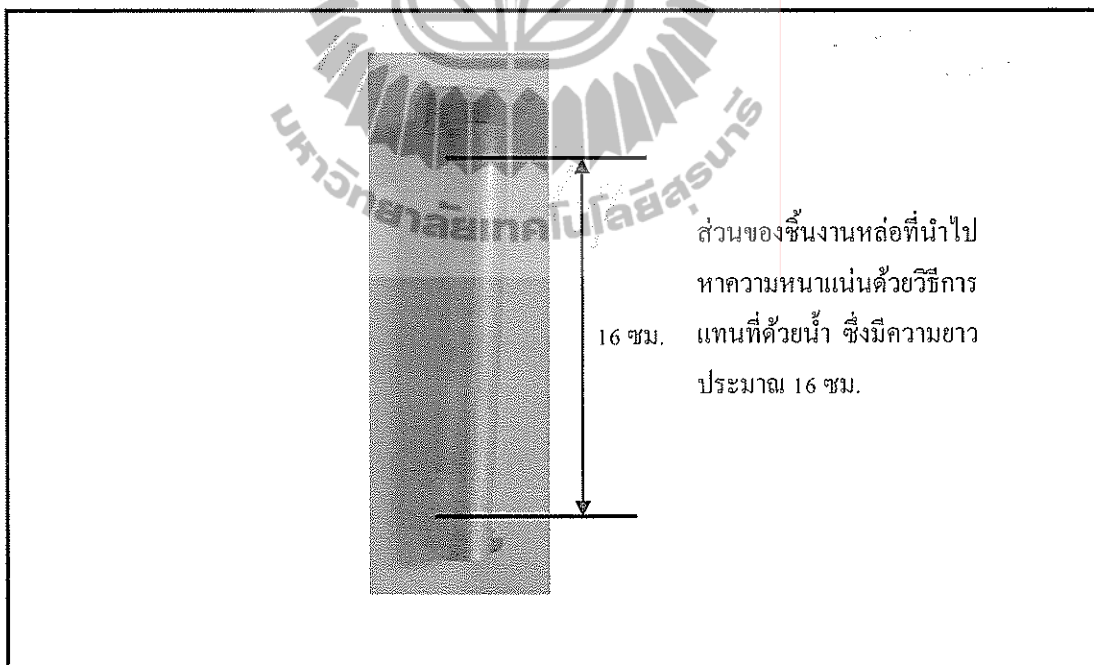
การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ (Archimede's method) โดยการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง และนำเครื่องชั่งมาประกอบกับอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.18 สำหรับชั่งน้ำหนักชิ้นงานขณะที่อยู่ในน้ำ ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความหนาแน่น โดยการตัดชิ้นงานหล่อให้มีความยาวประมาณ 16 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.19 ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานในอากาศ และชั่งน้ำหนักของชิ้นงานในน้ำ โดยคำนวณค่าความหนาแน่น ตามในสมการที่ 3.1

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักของชิ้นงาน}}{\text{น้ำหนักของชิ้นงาน} - \text{น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ}} \times \text{ความหนาแน่นของน้ำ} \quad (3.1)$$





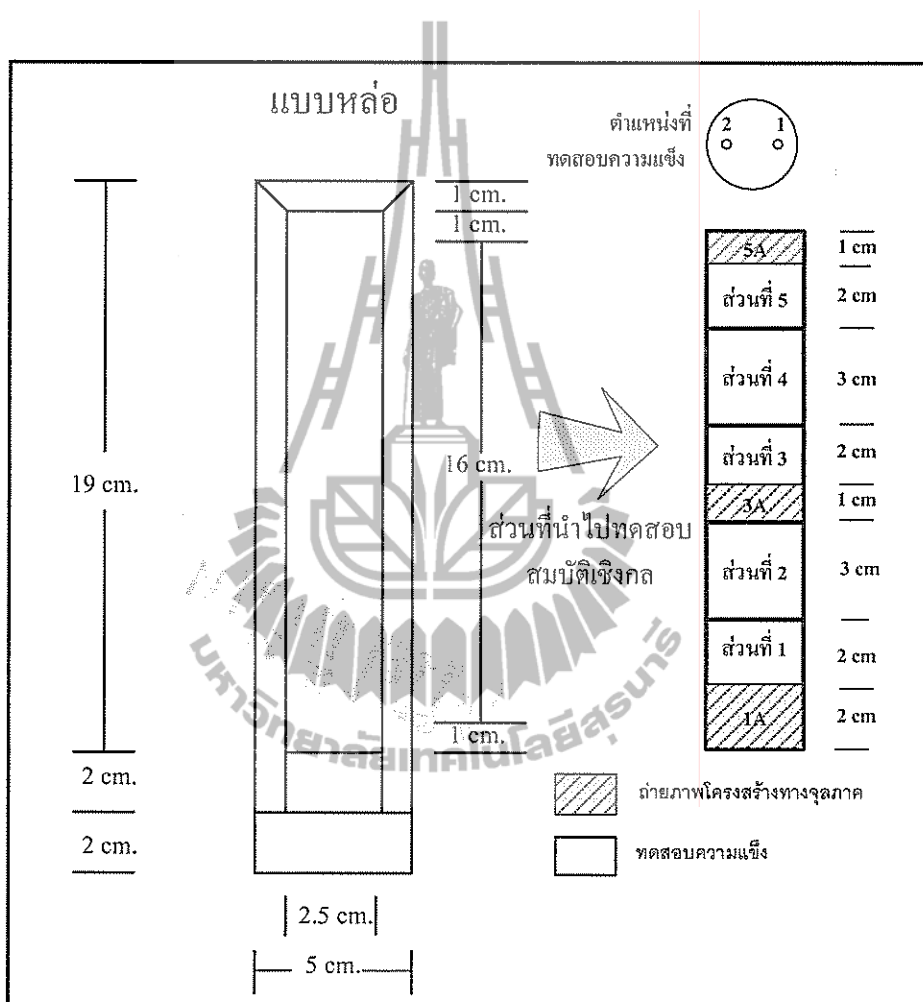
รูปที่ 3.18 แสดงการติดตั้งชุดเครื่องมือวัดความหนาแน่นด้วยการแทนที่ด้วยน้ำ



รูปที่ 3.19 ส่วนของชิ้นงานหล่อที่นำไปหาความหนาแน่น

### 3.3.7 การทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล

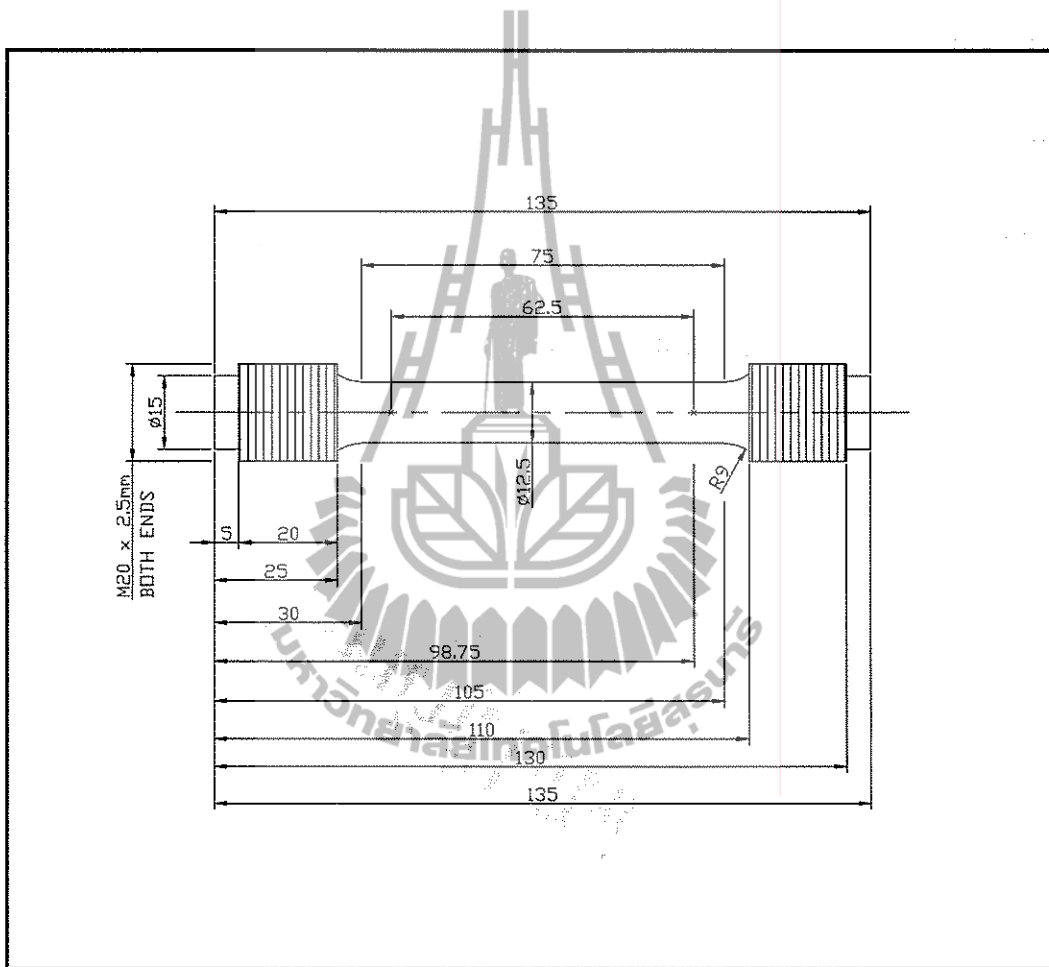
การทดสอบสมบัติความแข็งแรงของชิ้นงานหล่อ โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล โดยใช้แรงกดเท่ากับ 4.9 กิโลนิวตัน โดยแบ่งชิ้นงานหล่อเป็น 5 ส่วน และทดสอบความแข็งแรงตามตำแหน่งตามภาคตัดขวาง ส่วนละ 2 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงตำแหน่งของชิ้นงานหล่อที่นำไปทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล และวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค

### 3.3.8 การทดสอบแรงดึง

การตรวจสอบสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ขนาด 250 กิโลนิวตัน และใช้ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM B557M-02a แสดง ดังรูปที่ 3.21 โดยใช้ความเร็วในการดึงทดสอบ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.21 แสดงแบบชิ้นทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM B557M-02a

### 3.4 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

#### 3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

ในขั้นตอนนี้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.1

#### 3.4.2 วัสดุและสารเคมี

ในขั้นตอนนี้ใช้วัสดุและสารเคมี เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.2

#### 3.4.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ในขั้นตอนนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการทดลองที่มีความแตกต่างกันของส่วนผสมและปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยมีรายละเอียด แสดงดัง ตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงเงื่อนไขการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์

เงื่อนไขการทดลองที่	การปรับปรุงสมบัติเชิงกล			SiC <sub>p</sub> (wt.%)
	1 wt.% Mg	1 wt. %Al-5Ti-B	0.6 wt.%Sr	
1	×	×	×	0
2	✓	✓	✓	10
3	✓	✓	✓	15

#### 3.4.4 การหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน

3.4.4.1 การเตรียมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.4.1

3.4.4.2 ขั้นตอนการหลอมอะลูมิเนียม เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.4.2

3.4.4.3 ขั้นตอนการเติมธาตุผสม โดยนำ Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวให้มีอุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส

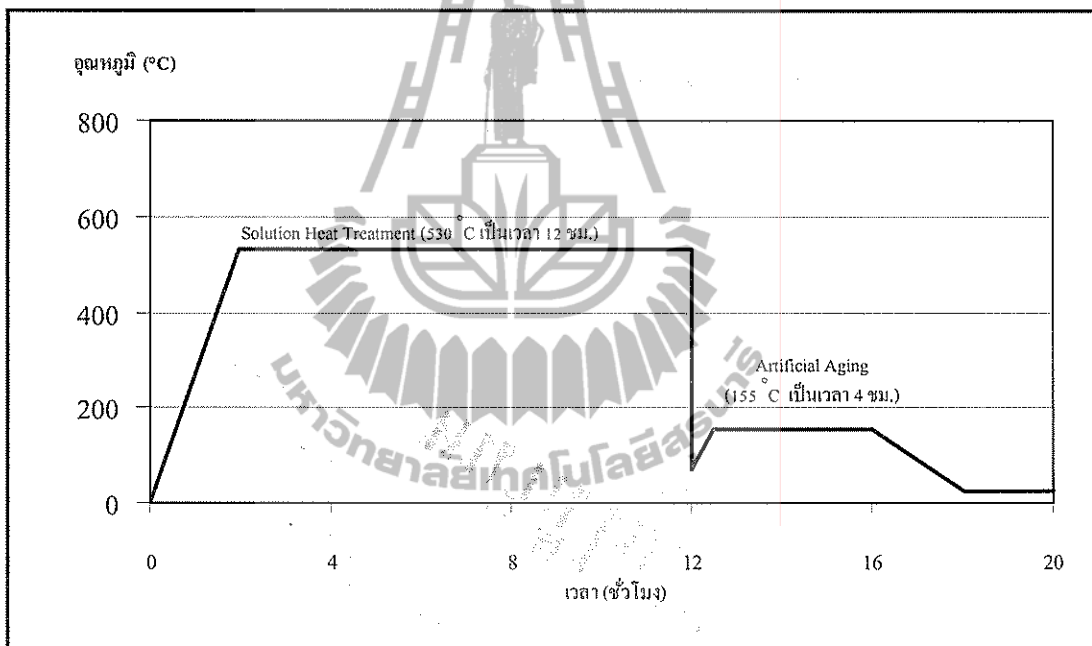
3.4.4.4 ขั้นตอนการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส และ

กวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะ อะลูมิเนียมไปที่ 650 องศาเซลเซียส พร้อมกับการกวนผสมความเร็วคงที่อย่างต่อเนื่องอีก 10 นาที

3.4.4.5 ขั้นตอนการเทหล่อขึ้นรูป เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.4.5

### 3.4.5 การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลภายหลังการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6)

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นหล่อด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยเริ่มจาก ขั้นตอนการอบละลาย ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงแผนภาพเวลาที่ใช้ในการทำ T6 Heat Treatment

### 3.4.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและการหาปริมาณเฟส

3.4.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.5.1

3.4.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณเฟส เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.5.2

3.4.6.3 การหาขนาดของเกรนอะลูมิเนียมปฐมภูมิโครงสร้างจุลภาค

การหาขนาดเกรนจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ตามมาตรฐาน ASTM E112 ด้วยการนับจำนวนเกรนจากภาพถ่ายกำลังขยาย 100 เท่า ในพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว และคำนวณหาขนาดเกรนในรูปแบบของหมายเลขขนาดเกรน (ASTM Grain Size Number) ตามสมการที่ 3.1

$$N = 2^{n-1} \quad (3.2)$$

โดยที่

N = จำนวนของเกรนต่อ 1 ตารางนิ้วที่ภาพถ่ายกำลังขยาย 100 เท่า

n = หมายเลขขนาดเกรน (ASTM Grain Size Number)

### 3.4.7 การตรวจสอบความหนาแน่น

การตรวจสอบความหนาแน่นด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ โดยมีวิธีการเช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.6 นอกจากนี้ ยังนำผลการตรวจสอบความหนาแน่นมาวิเคราะห์ในรูปแบบของความหนาแน่นทางทฤษฎี ร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎี และปริมาตรรูพรุนในชิ้นงานหล่อ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.4.7.1 การคำนวณค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี

การหาความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบแต่ละเงื่อนไขการทดลอง โดยใช้ข้อมูลจากน้ำหนักของวัสดุแต่ละชนิดที่เติมลงไปเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลอง หลังจากนั้นคำนวณหาปริมาตรของส่วนผสมจากค่าความหนาแน่น ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด ตามที่ได้แสดงในตารางที่ 3.5 โดยแสดงน้ำหนักและปริมาตรของส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบ ในตารางที่ 3.6 หลังจากนั้นนำปริมาตรและน้ำหนักของส่วนผสม มาคำนวณค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ตามสมการที่ 3.3 โดยผลการหาความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบพร้อมทั้งค่าความหนาแน่นของเฟสพื้นของแต่ละเงื่อนไขการทดลองแสดงในตารางที่ 3.7

นอกจากนั้นข้อมูลปริมาตร และน้ำหนักของส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบ ตามที่ได้แสดงในตารางที่ 3.5 นั้นยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาสัดส่วนโดยปริมาตรของ SiC<sub>p</sub> และเฟสพื้นในวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้สมการที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของ SiC<sub>p</sub> และเฟสพื้นในวัสดุเชิงประกอบแต่ละเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 3.7

$$\rho_{theory} = \frac{m_{SiC} + m_{Al} + m_{Al-5Ti-B} + m_{Sr}}{V_{SiC} + V_{Al} + V_{Al-5Ti-B} + V_{Sr}} \quad (3.3)$$

โดย

$$m_{SiC} = \text{น้ำหนักของซิลิคอนคาร์ไบด์}$$

$$V_{SiC} = \text{ปริมาตรของซิลิคอนคาร์ไบด์}$$

$$m_{Al} = \text{น้ำหนักของอะลูมิเนียม}$$

$$V_{Al} = \text{ปริมาตรของอะลูมิเนียม}$$

$$m_{Al-5Ti-B} = \text{น้ำหนักของ Al-5Ti-B}$$

$$V_{Al-5Ti-B} = \text{ปริมาตรของ Al-5Ti-B}$$

$$m_{Sr} = \text{น้ำหนักของ Al-10Sr}$$

$$V_{Sr} = \text{ปริมาตรของ Al-10Sr}$$

$$\text{สัดส่วนโดยปริมาตรของ SiC}_p = \frac{\text{ปริมาตรของ SiC}_p}{\text{ปริมาตรของวัสดุเชิงประกอบ}} \quad (3.4)$$

$$\text{สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสพื้น} = 1 - \text{สัดส่วนโดยปริมาตรของ SiC}_p \quad (3.5)$$

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความหนาแน่นของธาตุผสมที่ใช้ในการทดลอง (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, 2553)

วัสดุ	ความหนาแน่น (กรัม/ซม <sup>3</sup> )
อะลูมิเนียม (Al)	2.700
แมกนีเซียม (Mg)	1.738
สตรอนเทียม (Sr)	2.600
ไทเทเนียม (Ti)	4.507
โบรอน (B)	2.300
Al-10Sr	$(2.7 \times 90 + 2.6 \times 10) / 100 =$
Al-5Ti-B	$(2.7 \times 94 + 4.507 \times 5 + 2.3 \times 1) / 100 =$

ตารางที่ 3.6 แสดงน้ำหนักและปริมาตรของส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	ส่วนผสม										W <sub>total</sub> (g)	V <sub>total</sub> (cm <sup>3</sup> )
	Al		Mg		Al-10%Sr		Al-5Ti-B		SiC <sub>p</sub> (ρ=3.22 g/cm <sup>3</sup> )			
	W (g)	V (cm <sup>3</sup> )	W (g)	V (cm <sup>3</sup> )	W (g)	V (cm <sup>3</sup> )	W (g)	V (cm <sup>3</sup> )	W (g)	V (cm <sup>3</sup> )		
1	100	37.037	0	0	0	0	0	0	0	0	100	37.037
6	100	37.037	1	0.575	0.6	0.223	1	0.359	10	3.106	112.6	41.300
7	100	37.037	1	0.575	0.6	0.223	1	0.359	15	4.658	117.6	42.853

ตารางที่ 3.7 แสดงความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบ สกัดส่วนโดยปริมาตรของ SiC<sub>p</sub> และเฟสพื้นในวัสดุเชิงประกอบแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	ปริมาณของ SiC <sub>p</sub> (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (กรัม/ซม. <sup>3</sup> )		สัดส่วนโดยปริมาตรของ SiC <sub>p</sub> ในวัสดุเชิงประกอบ	สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสพื้นในวัสดุเชิงประกอบ
		วัสดุเชิงประกอบ	เฟสพื้น		
1	0	2.700	2.700	0	1
6	10	2.726	2.686	0.075	92.025
7	15	2.744	2.686	0.109	0.891

#### 3.4.7.2 การคำนวณค่าร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎีและร้อยละของปริมาตรรูพรุนในชิ้นงานหล่อ

ความหนาแน่นเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง ด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ดังที่ได้แสดงไว้ใน สมการที่ 3.3 และแสดงในรูปแบบของร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎี ตามนิยามในสมการที่ 3.6 นอกจากนี้ยังใช้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ในการคำนวณหาปริมาตรรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ ตามสมการที่ 3.7 ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณหาปริมาตรรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ ในตารางที่ 3.8



$$\text{ร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎี} = \frac{\rho_m}{\rho_t} \times 100 \quad (3.6)$$

$$\text{ร้อยละของปริมาตรรูพรุนในชิ้นงานหล่อ} = \frac{\rho_m}{w_m} \left( \frac{w_m}{\rho_m} - \frac{w_m}{\rho_t} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ

$\rho_m$  = ความหนาแน่นจากการทดสอบด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ (Measured Density)

$\rho_t$  = ความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical Density)

$w_m$  = น้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 3.8 แสดงปริมาตรรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากวิธีการคำนวณ

เงื่อนไขการทดลองที่	ความหนาแน่น (ค่าทางทฤษฎี) (กรัม/ซม. <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (จากการทดลอง) (กรัม/ซม. <sup>3</sup> )	ปริมาตรรูพรุนในชิ้นงานหล่อ จากการคำนวณ (ร้อยละ)
1-1	2.700	2.665	1.30
1-2	2.700	2.659	1.53
6-1	2.726	2.558	6.16
6-2	2.726	2.559	6.11
7-1	2.744	2.557	6.83
7-2	2.744	2.557	6.81

#### 3.4.8 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ การทดสอบความแข็งแบบบริเนล และการทดสอบแรงดึง โดยมีรายละเอียด เช่นเดียวกับข้อที่ 3.3.7 และข้อที่ 3.3.8 ตามลำดับ

#### 3.4.9 การถ่ายภาพพื้นผิวการแตกหักเนื่องจากการทดสอบแรงดึง

การถ่ายภาพพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบแรงดึง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JSM-5800LV ซึ่งใช้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ และถ่ายภาพที่กำลังขยาย 20 เท่า 50 เท่า 200 เท่า 400 เท่า และ 800 เท่า บนพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานเคลือบด้วยคาร์บอน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบด้วยการเติมธาตุผสม ที่มีความแตกต่างกัน 4 เงื่อนไขการทดลอง ดังนี้

- 1) การเติม Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 2) การเติม Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 3) การเติม Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 4) การเติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

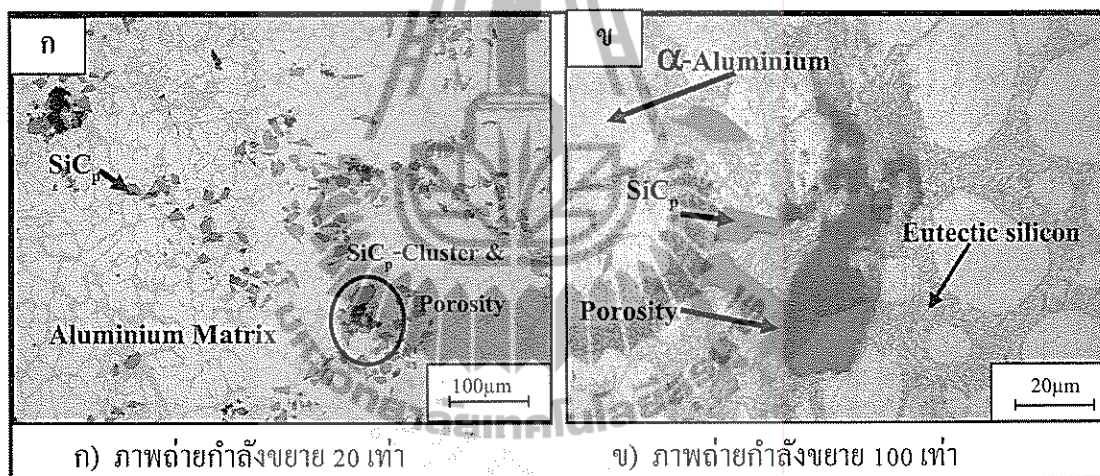
ทั้งนี้เพื่อคัดเลือกรูปแบบการเติมธาตุผสมตามเงื่อนไขการทดลองดังกล่าว ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ สำหรับศึกษาผลกระทบของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบตามหัวข้อที่ 4.2-4.9 โดยแสดงรายละเอียดในส่วนของการทดลองเบื้องต้น ดังนี้

- โครงสร้างจุลภาคและปริมาณเฟสของวัสดุเชิงประกอบที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม
- ผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ
- สรุปผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

##### 4.1.1 ผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาคและปริมาณเฟสของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ โลหะพื้นอะลูมิเนียม (Aluminium matrix) ซิลิคอนคาร์ไบด์ ( $\text{SiC}_p$ ) และรูพรุน (Porosity) แสดงในรูปที่ 4.1 ก) โดยซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาคนั้น มัก

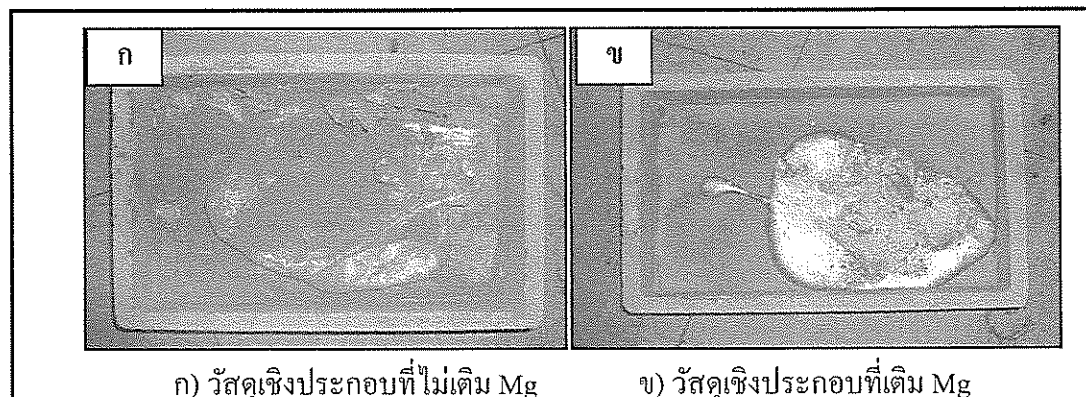
อยู่ร่วมกับรูปพรุนซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติก (Eutectic phase) ที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ข) การที่จะทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมกับอะลูมิเนียมได้ตามปริมาณที่เติมลงไปนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากความแตกต่างของชนิดวัสดุที่นำมาผสมกันและข้อจำกัดของความสามารถในการเปียกระหว่างอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลวกับซิลิคอนคาร์ไบด์ จึงทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์บางส่วนแยกตัวออกจากวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งในเบื้องต้นสามารถสังเกตการแยกตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้จากการตรวจสอบส่วนผสมที่เหลือจากการหล่อ ภายหลังจากเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง แสดงตามรูปที่ 4.2 สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg ลงในน้ำโลหะก่อนเทลงแบบหล่อ แสดงในรูปที่ 4.2 ก) จะพบการแยกตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์มากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg ก่อนเทลงแบบหล่อแสดงในรูปที่ 4.2 ข)



ก) ภาพถ่ายกำลังขยาย 20 เท่า

ข) ภาพถ่ายกำลังขยาย 100 เท่า

รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบบนโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม



ก) วัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg

ข) วัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg

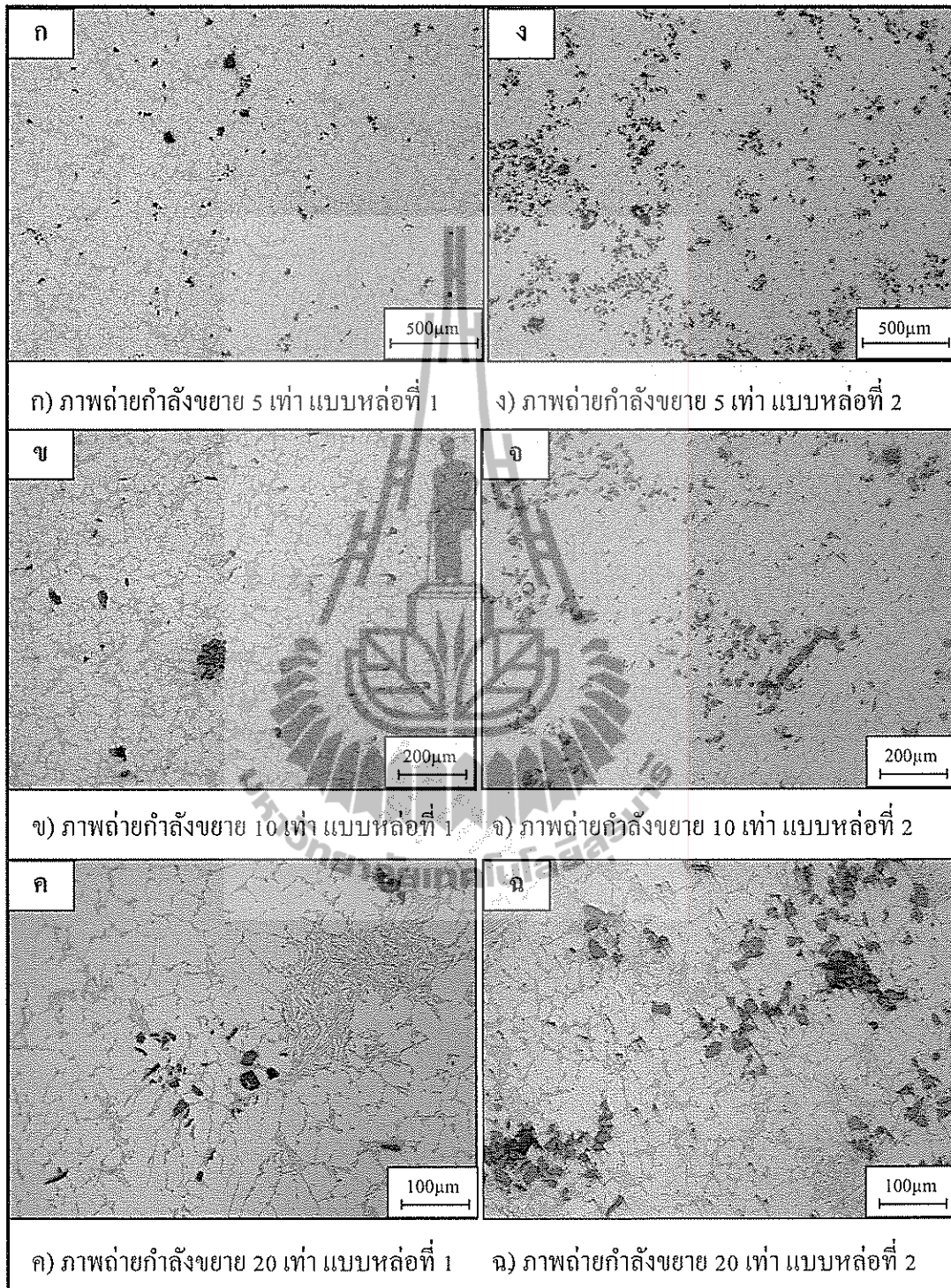
รูปที่ 4.2 แสดงการแยกตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จากวัสดุเชิงประกอบ

สำหรับ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จะมีลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน ตามเงื่อนไขการทดลองที่มีความแตกต่างของสถานะการเติมธาตุผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อปริมาณและการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค โดยรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับเงื่อนไขการทดลองนี้ ตรวจพบความแตกต่างของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่หล่อในแบบหล่อที่ 1 และแบบหล่อที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.3 ก-ค) และ 4.3 ง-ฉ) ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของซิลิคอนคาร์ไบด์ในน้ำโลหะผสมก่อนเทลงแบบหล่อ รวมถึงเกิดการตกตะกอนของซิลิคอนคาร์ไบด์บางส่วนทำให้พบปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในตัวอย่างที่หล่อในแบบหล่อที่ 2 มากกว่าในแบบหล่อที่ 1 นอกจากนี้ยังพบว่าซิลิคอนคาร์ไบด์มักอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล

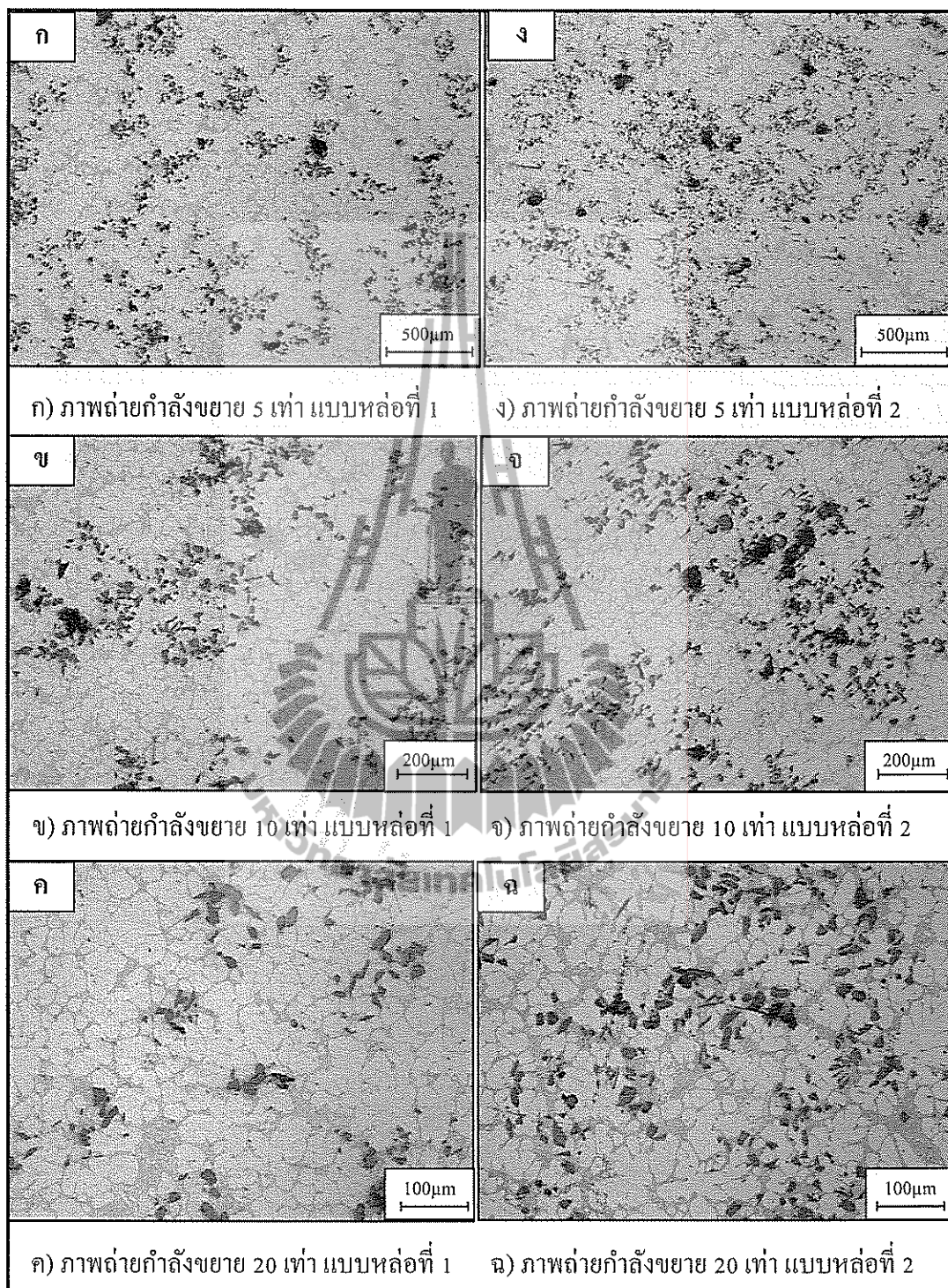
ส่วนผลจากการเติม Sr หรือ Sr ร่วมกับ Al-5Ti-B ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบนั้น ได้แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ จะเห็นว่าผลของการเติม Sr ทำให้มีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาคมากกว่าเงื่อนไขการทดลองที่เติม Al-5Ti-B เพียงอย่างเดียว ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม Sr ทำให้มีความแตกต่างของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ระหว่างการหล่อในแบบหล่อที่ 1 และแบบหล่อที่ 2 ลดลง โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เติม Sr ที่หล่อในแบบหล่อที่ 1 และแบบหล่อที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.4 ก-ค) และ 4.4 ง-ฉ) ตามลำดับ ส่วนโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เติม Sr ร่วมกับ Al-5Ti-B ที่หล่อในแบบหล่อที่ 1 และแบบหล่อที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.5 ก-ค) และ 4.5 ง-ฉ) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งสองเงื่อนไขการทดลองก็ยังพบลักษณะของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อยู่ร่วมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งมีขนาดใหญ่และจำนวนมากอยู่ร่วมกับรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างจุลภาค ลักษณะดังกล่าวอาจเกิดเนื่องจากข้อจำกัดของสมบัติการเปียกระหว่างอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ทำให้มีซิลิคอนคาร์ไบด์บางส่วนไม่ผสมกับน้ำโลหะอะลูมิเนียม นอกจากนี้ซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยมือก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีอากาศปะปนกับซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนที่จะเข้าไปผสมกับอะลูมิเนียม เมื่อน้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความสามารถในการเปียกต่ำจะมีแรงตึงผิวสูง จึงเป็นเรื่องยากที่อะลูมิเนียมไหลอมเหลวจะเปียกกับซิลิคอนคาร์ไบด์ แต่น้ำโลหะอะลูมิเนียมนี้จะอยู่ล้อมรอบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์และจะทำหน้าที่เป็นแนวป้องกันไม่ให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวแยกออกจากกลุ่ม ถึงแม้ว่าจะใช้การกวนผสมเพื่อแยกกลุ่มของซิลิคอน

คาร์ไบด์แล้วก็ตาม อีกทั้งเทคนิคการกวนผสมเองก็จะเป็นวิธีการที่ทำให้มีฟองอากาศเข้าไปผสมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้มากขึ้น (Samuel, Gotmare and Samuel, 1995) นอกจากนั้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะบริเวณขอบเกรนจะเป็นบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุด และจะเป็นแหล่งรวมของอนุภาคเจือปนและก๊าซ (Gruzleski and Closset, 1990) ปัจจัยที่กล่าวมาเป็นสิ่งสนับสนุนให้พบซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อยู่ร่วมกับรูพรุนบริเวณขอบเกรน

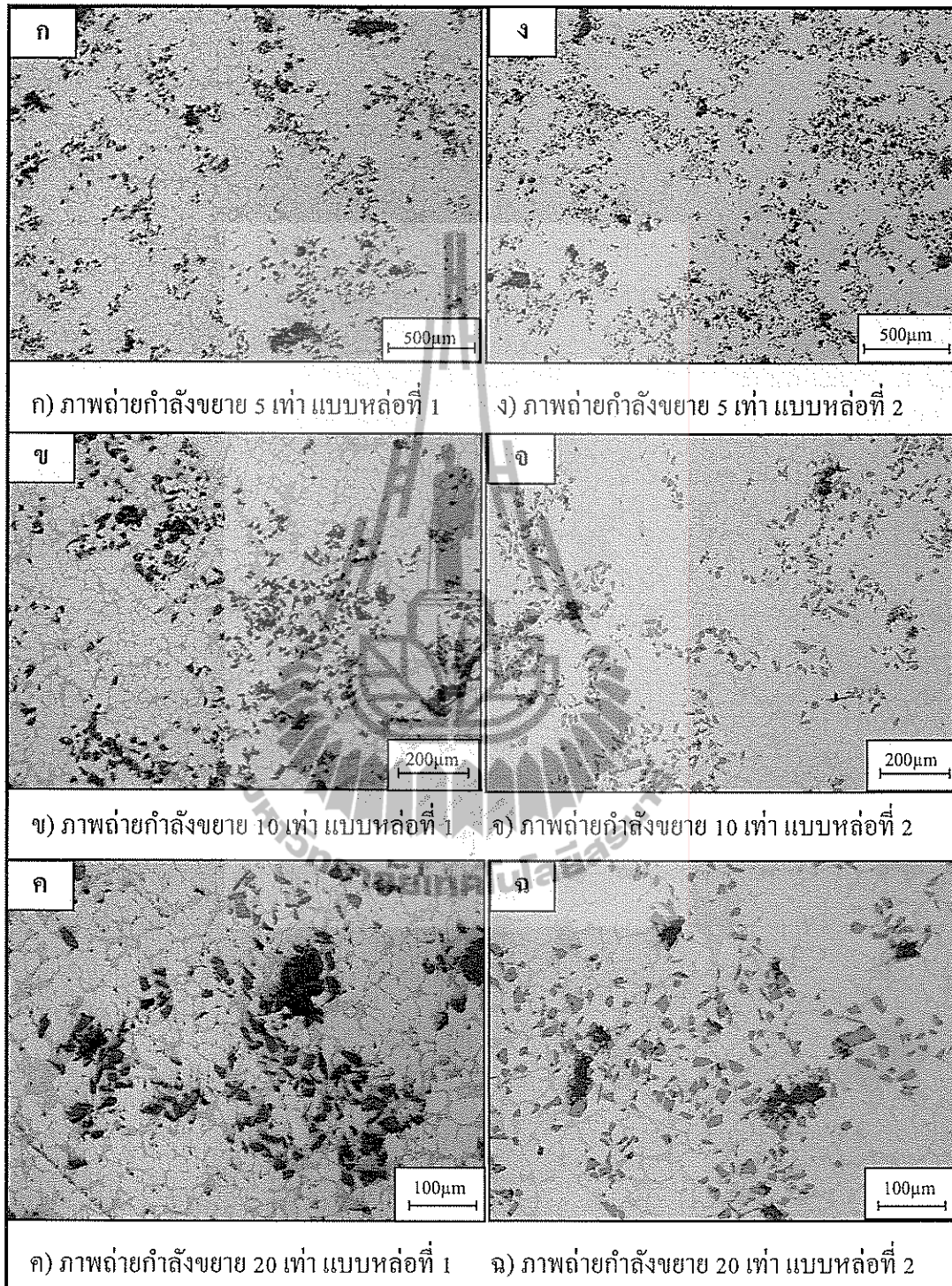
ส่วนลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีที่สุดในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งนอกจากจะพบลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สม่ำเสมอในโครงสร้างจุลภาคแล้ว ยังตรวจพบความแตกต่างของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพียงเล็กน้อยในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่หล่อในแบบหล่อที่ 1 และแบบหล่อที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ก-ค) และ 4.6 ง-ค) ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการกระจายตัวที่ดีของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวน่าจะเป็นผลมาจากการเติม Mg เพื่อเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างน้ำโลหะอะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นการลดแรงตึงผิวของอะลูมิเนียมหล่อมหลวดด้วยปฏิกิริยาเคมี (Hashim, Looney and Hashmi, 1999) จึงทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถเข้าไปผสมกับอะลูมิเนียมได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมลดลงทำให้อะลูมิเนียมเปียกกับซิลิคอนคาร์ไบด์ได้มากขึ้น ดังนั้นการกวนผสมจึงมีประสิทธิภาพในการแยกกลุ่มซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นการลดจำนวนของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มในโครงสร้างทางจุลภาค ดังนั้นในแง่ของการทดลองนี้จึงพบกลุ่มซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กในโครงสร้างทางจุลภาค แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการเติม Mg จะเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างน้ำโลหะอะลูมิเนียมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ตาม แต่ในกระบวนการแข็งตัวของโลหะซึ่งพบว่าบริเวณขอบเกรนก็ยังเป็นแหล่งรวมของอนุภาคเจือปนและก๊าซ (John and Bernard, 1990) จึงทำให้มีกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ร่วมกับรูพรุนบริเวณขอบเกรนกระจายอยู่บ้างในโครงสร้างทางจุลภาค



รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

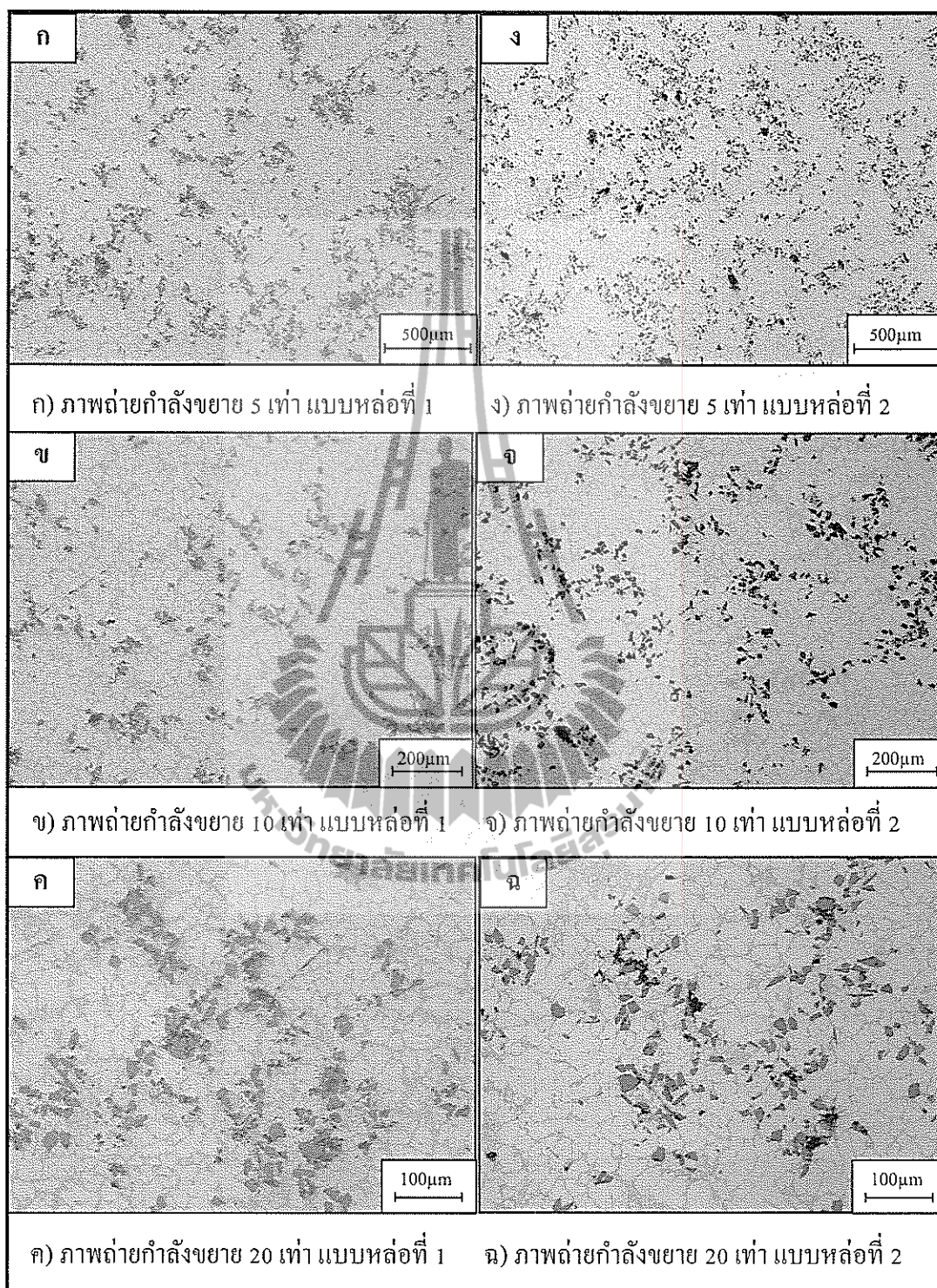


รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค  
ซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



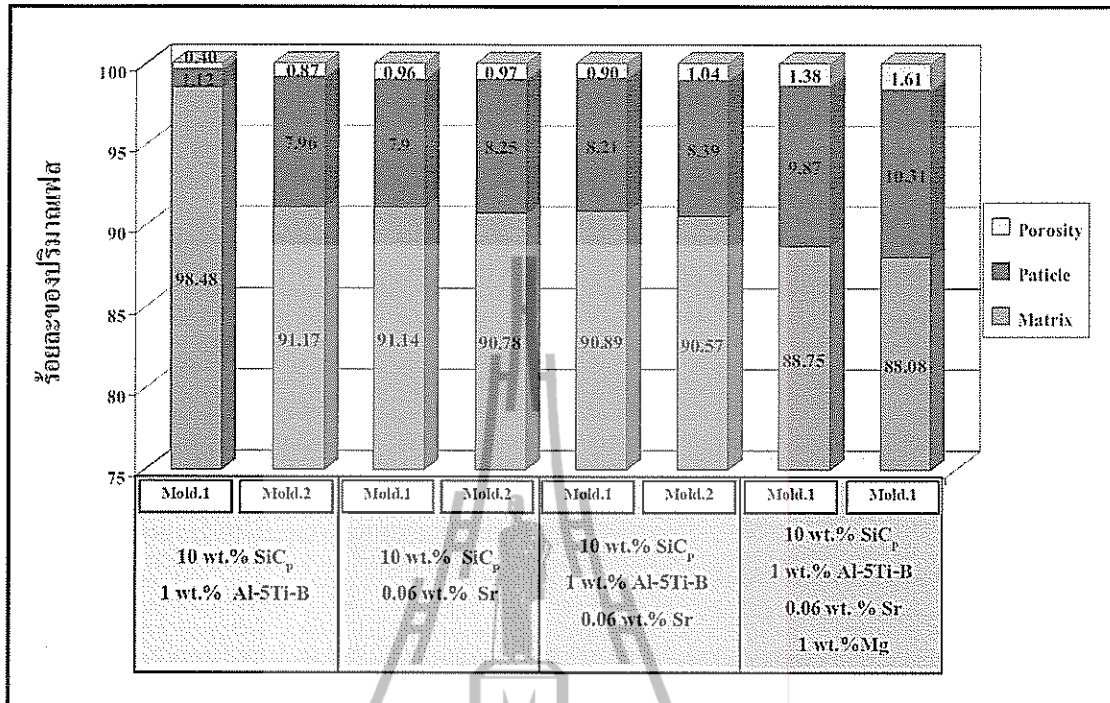
รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก





รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาควัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค  
ซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก  
ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพเพื่อหาปริมาณเฟสพื้น รุพุนและเฟสเสริมแรง ภายใต้สมมติฐานว่า “ร้อยละโดยพื้นที่ เท่ากับร้อยละโดยปริมาตร” โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลองที่เติมธาตุผสมแตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ในแบบหล่อที่ 2 สูงกว่าในแบบหล่อที่ 1 ทุกเงื่อนไขการทดลอง คาดว่าเกิดจากการตกตะกอนร่วมกับการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของซิลิคอนคาร์ไบด์ในวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะเงื่อนไขการทดลองที่เติม Al-5Ti-B เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานที่หล่อในแบบหล่อที่ 2 เท่ากับ 7.96 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าตัวอย่างที่หล่อในแบบหล่อที่ 1 ซึ่งมีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เท่ากับ 1.12 เปอร์เซ็นต์ แต่ความแตกต่างของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ระหว่างชิ้นงานที่หล่อในแบบหล่อที่ 1 และแบบหล่อที่ 2 นี้ลดลง เมื่อเติม Sr คาดว่าอาจเป็นเพราะว่าการเติม Sr นอกจากจะเป็นการปรับปรุงรูปร่างของยูเทคติกซิลิคอนให้มีลักษณะ โคนมนและมีขนาดเล็กซึ่งทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวได้ดีขึ้นในโครงสร้างทางจุลภาค แล้วนั้น การเติม Sr ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Lashgari, Emamy, Razaghian, Najimi, 2009) จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เติม Sr หรือ Sr ร่วมกับ Al-5Ti-B มีปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาคเพิ่มขึ้นมากกว่าการเติม Al-5Ti-B เพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามทั้งสามเงื่อนไขการทดลองที่กล่าวมา พบว่ามีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์น้อยกว่าเงื่อนไขการทดลองที่เติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Sr และ Al-5Ti-B โดยมีซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าไปผสมในวัสดุเชิงประกอบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสมีความสอดคล้องกับการสังเกตปริมาณการแยกตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ออกจากวัสดุเชิงประกอบ จากส่วนผสมที่เหลือจากการหล่อ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ภาพก็แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นก็จะพบปริมาณรูพุนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



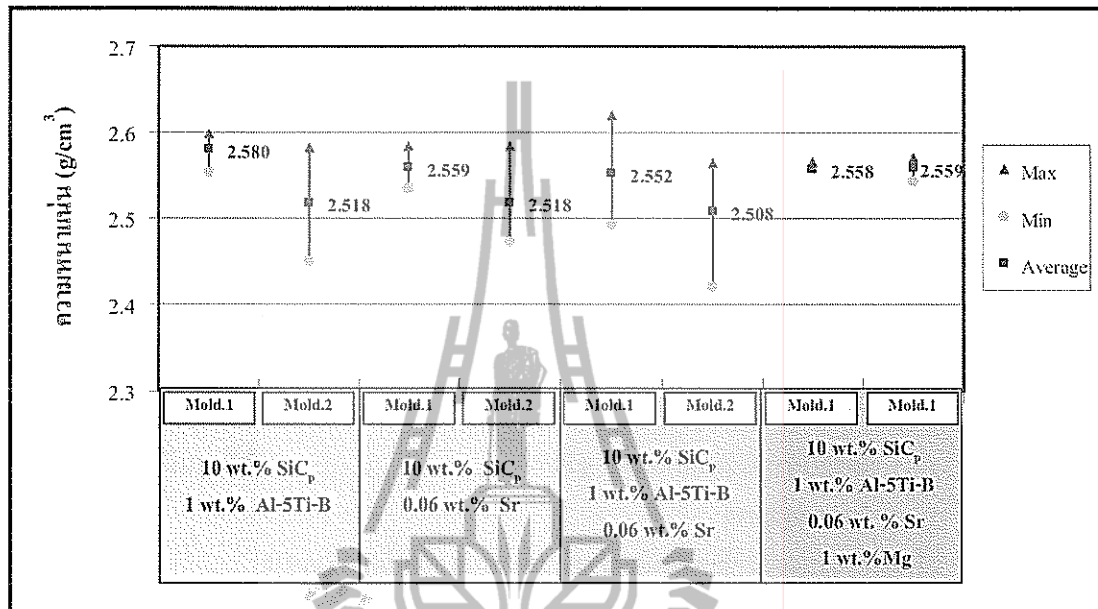
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม

#### 4.1.2 ผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

##### 4.1.2.1 สมบัติความหนาแน่น

สำหรับค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าเงื่อนไขการทดลองที่เติม Al-5Ti-B หรือ Sr ลงในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนเทลงแบบหล่อ นั้นทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีความแปรปรวนของข้อมูลสูง สังเกตได้จากค่าสูงสุดและต่ำสุดของความหนาแน่นที่มีความแตกต่างกันมาก นอกจากนั้นค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่หล่อจากแบบหล่อที่ 1 และแบบหล่อที่ 2 ก็มีค่าที่แตกต่างกันมากเช่นเดียวกัน ซึ่งความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นที่พบยังมีค่าสูงถึงแม้ว่าจะปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบด้วยการเติม Al-5Ti-B และ Sr ร่วมกัน แต่จากผลการทดลองยืนยันได้ว่าการเติม Mg ลงในวัสดุเชิงประกอบเป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบมีความแปรปรวนลดลง โดยแสดงให้เห็นในเงื่อนไขการทดลองที่เติม Mg ร่วมกับ Al-5Ti-B และ Sr ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ระหว่างชิ้นงานที่หล่อในแบบหล่อที่ 1 และในแบบหล่อที่ 2 ที่มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย เท่ากับ 2.558 กรัม

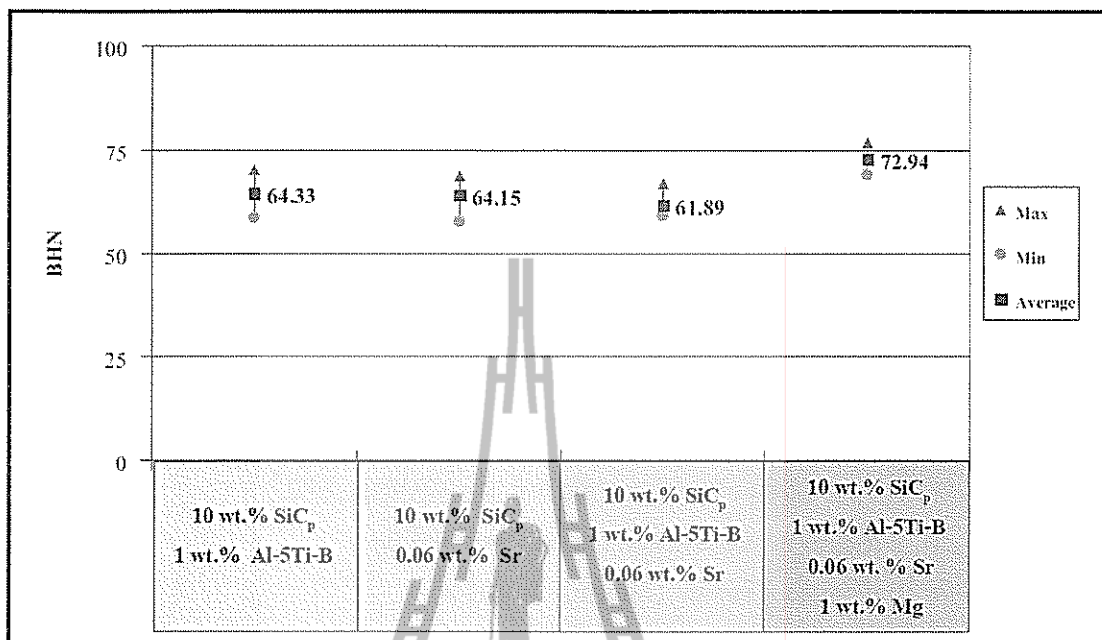
ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 2.559 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ น่าจะมีสาเหตุมาจาก ซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถเข้าไปผสมกับวัสดุเชิงประกอบในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.8 แสดงความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม

#### 4.1.2.2 สมบัติความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนลของวัสดุเชิงประกอบที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งเฉลี่ยสูงสุดคือ วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นธาตุผสม ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ย 72.94 BHN ทั้งนี้เป็นเงื่อนไขการทดลองที่พบว่ามีซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบในปริมาณมากที่สุด และมีลักษณะการกระจายตัวที่ดีของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาค กอรปกับเงื่อนไขการทดลองนี้พบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนไม่มากกระจายอยู่บ้างในโครงสร้างทางจุลภาค ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ลักษณะที่กล่าวมานั้นล้วนเป็นผลดีต่อสมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ

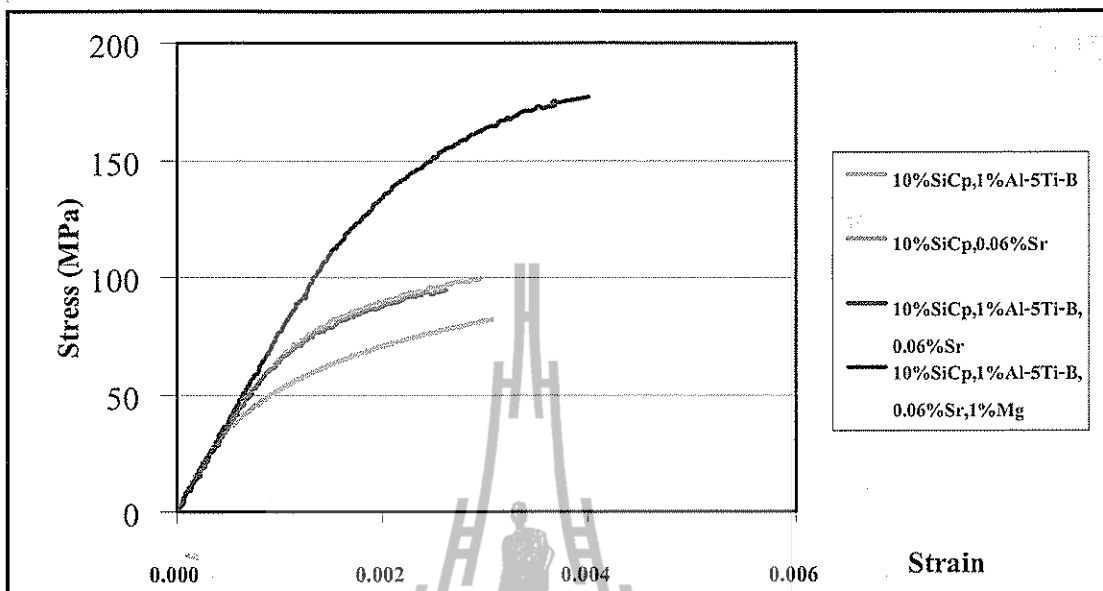


รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม

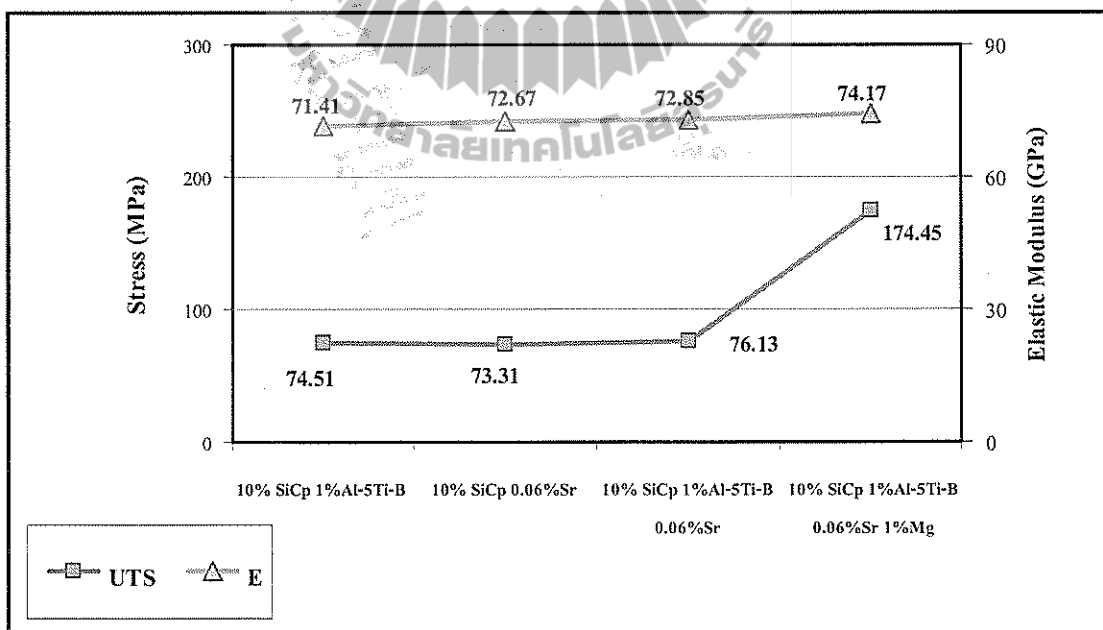
#### 4.1.2.3 สมบัติแรงดึง

การวิเคราะห์พฤติกรรมกลายรูปภายใต้แรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสมได้แสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในรูปที่ 4.10 พบว่าทุกเงื่อนไขการทดลองแสดงค่าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูป (Elastic limit) แต่ไม่เกิดการคราก (Yielding) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุได้ว่าการเสริมแรงให้กับอะลูมิเนียมด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์นั้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีพฤติกรรมแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) และพบว่าเงื่อนไขการทดลองที่เติม Mg ร่วมกับ Sr และ Al-5Ti-B มีสมบัติแรงดึงที่ดี ทั้งค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ดีกว่าเงื่อนไขอื่นในการทดลอง

ส่วนผลการทดสอบแรงดึง ซึ่งได้แสดงในรูปแบบของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยและโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus: E) แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าแนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 โดยเงื่อนไขการทดลองที่เติม Mg ร่วมกับ Sr และ Al-5Ti-B ก่อนเทลงแบบหล่อนั้น มีสมบัติแรงดึงที่ดี ทั้งค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น โดยมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย เท่ากับ 175 MPa และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 74 GPa



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความเค้น ความเครียดของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผลกระทบจากการเติมธาตุผสม

#### 4.1.3 สรุปผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ในส่วนของการทดลองในขั้นตอนนี้ แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ เพื่อหาเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีและมีความสม่ำเสมอในโครงสร้างจุลภาค และพบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาคจำนวนน้อย และยังทำให้วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีสมบัติที่ดี ทั้งค่าความหนาแน่น ความแข็ง และสมบัติแรงดึง

ดังนั้นจากผลการทดลองเบื้องต้นนี้ จึงได้นำเงื่อนไขในการทดลองที่ปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยการเติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งผลการทดลองจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

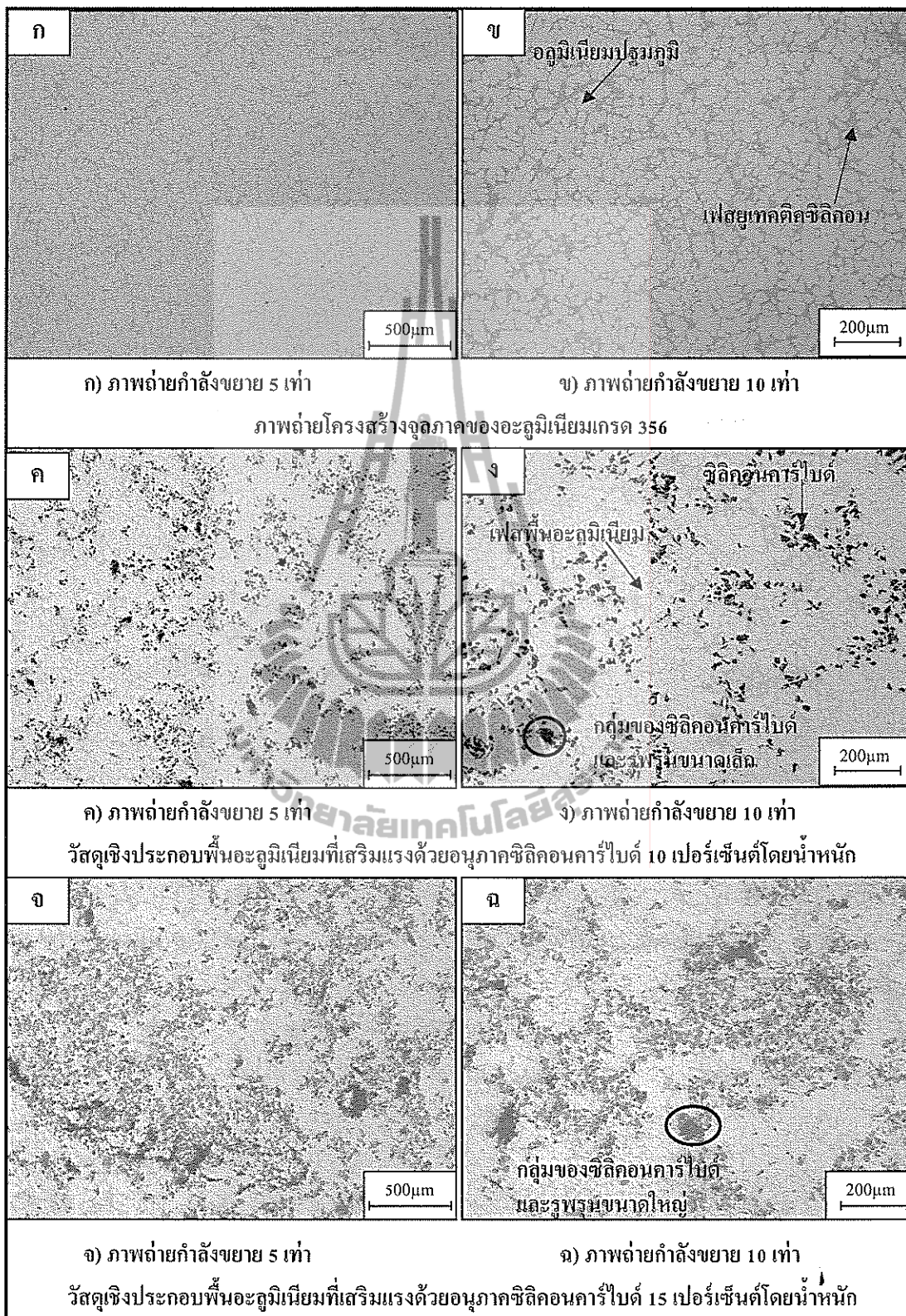


#### 4.2 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

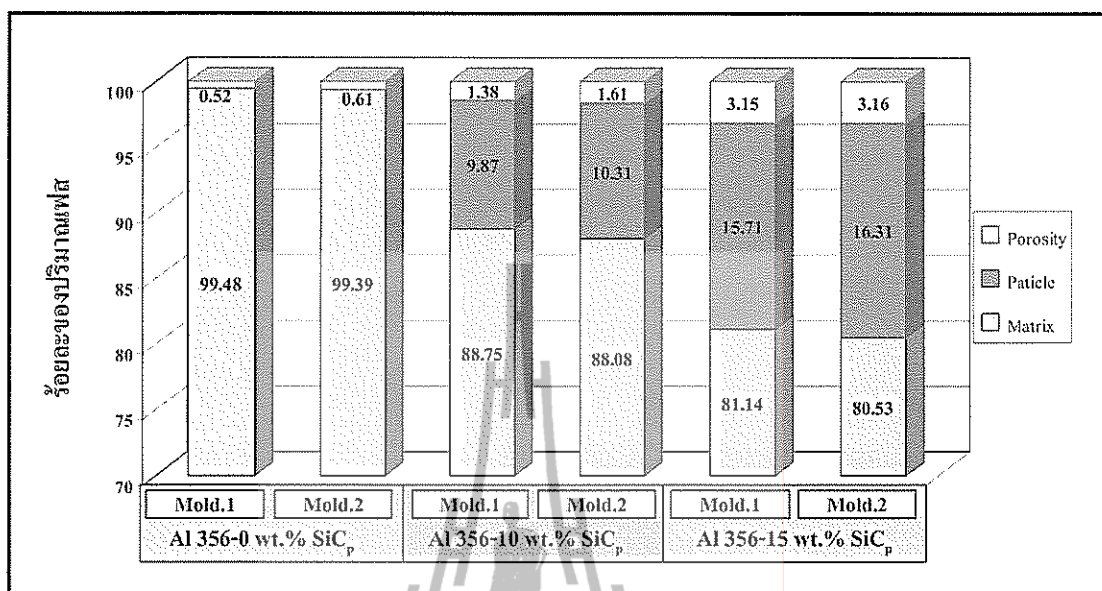
จากการตรวจสอบภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคอะลูมิเนียมเกรด 356 แสดงในรูปที่ 4.12 ก-ข) พบว่าเกรนอะลูมิเนียมปฐมภูมิมีลักษณะค่อนข้างกลม และมีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 43.75 ไมโครเมตร หรือ Grain Size Number 6.1 ตามมาตรฐานของ ASTM 112 ส่วนการสังเกตภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.12 ค-ง) และ 4.12 จ-ฉ) ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น ในโครงสร้างจุลภาค แต่ลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่สม่ำเสมอ และยังพบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งมักอยู่ร่วมกับรูพรุนที่มีขนาดใหญ่จำนวนมาก กระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จ-ฉ) ลักษณะดังกล่าวย่อมไม่เป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ส่วน โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีและพบกลุ่มซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยกระจายอยู่บ้างในโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ค-ง)

สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มมากขึ้น จะพบว่ามีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยตรวจพบปริมาณรูพรุนมากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่ารูพรุนที่ตรวจพบใน โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีรูพรุนน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณรูพรุนที่พบในโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 356 พบว่ามีจำนวนน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์





รูปที่ 4.12 แสดง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ด้วยปริมาณ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



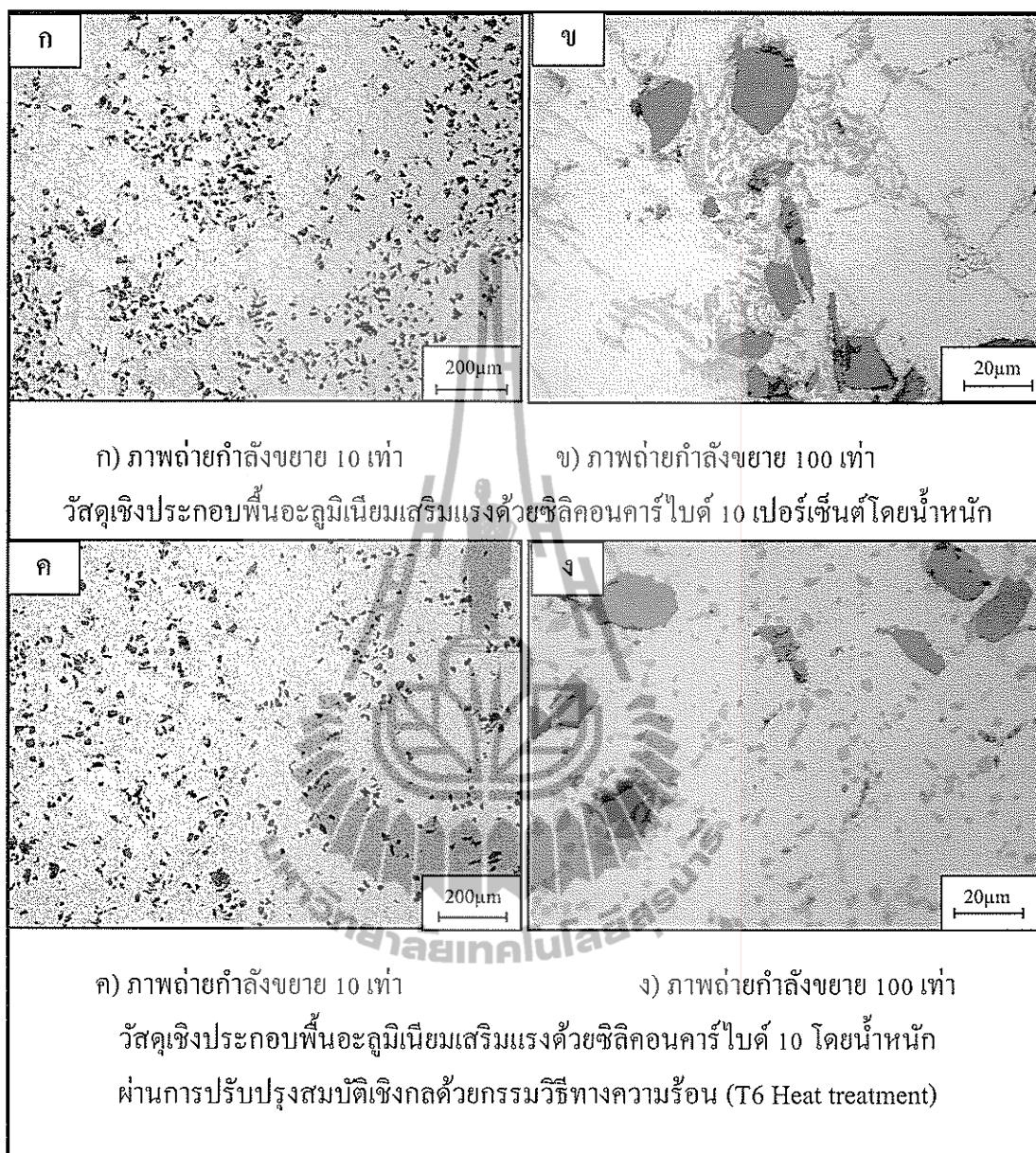
รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์ปริมาณเฟสของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยปริมาณ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.3 ผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ในส่วนหนึ่งของการวิจัย ได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคซิลิคอนที่มีขนาดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในโครงสร้าง โดยอนุภาคเล็ก ๆ ที่ตกตะกอนนี้จะเป็นสาเหตุหลักที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม แต่เมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคที่ตกตะกอนนี้ ก็จะมีขนาดโตมากขึ้นจนเป็นผลเสียต่อความแข็งแรงของโลหะ ตามที่ได้กล่าวไว้ในข้อที่ 2.8.2 แต่เนื่องจากอนุภาคที่ตกตะกอนนี้มีขนาดเล็กมาก (Sub-micron) จึงไม่สามารถตรวจพบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แต่อย่างไรก็ดีการเพิ่มสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนก็เป็นผลทำให้โครงสร้างเฟสพื้นมีความสม่ำเสมอ (Homogenization) มากขึ้น เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดการแพร่ของธาตุผสมได้ง่ายขึ้นและยังทำให้ความสามารถในการละลาย (Solubility) เพิ่มขึ้น (The American Foundrymen's Society, Inc. 1993) เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถตรวจพบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงในรูปที่ 4.14 โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน แสดงในรูปที่ 4.14 ก-ข) พบว่ายูเทคติกซิลิคอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบ

เกรนอยู่ในรูปแบบของเส้นใยสั้น ๆ (Short fiber) เนื่องจากผ่านการปรับปรุงทรงของยูเทคติกซิลิคอนให้มีขนาดเล็ก และแสดงให้เห็นเป็นลักษณะโครงข่าย (Networks) บริเวณขอบเกรน (The American Foundrymen's Society, Inc.) ซึ่งลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากโลหะมีธาตุผสมเจือปนและในกระบวนการแข็งตัวในสถานะที่ไม่สมดุล (Nonequilibrium solidification) ของโลหะทำให้เกิดความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีตามตำแหน่งภายในเซลล์ของโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite cells) โดยปริมาณของโครงข่ายที่เกิดขึ้นในเฟสยูเทคติกนี้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะผสมและอัตราเร็วในการแข็งตัว โดยผลกระทบจากความร้อนจากกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนของแข็งนั้น ทำให้เกิดการแพร่ของธาตุผสมภายใน Dendrite cells จึงทำให้โครงสร้างพื้นอะลูมิเนียมมีการกระจายตัวของธาตุผสมที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นและลดการเกิดลักษณะโครงข่ายบริเวณเฟสยูเทคติก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 ค-ง)





รูปที่ 4.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ  
 ภายหลังการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทาง  
 ความร้อน

#### 4.4 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

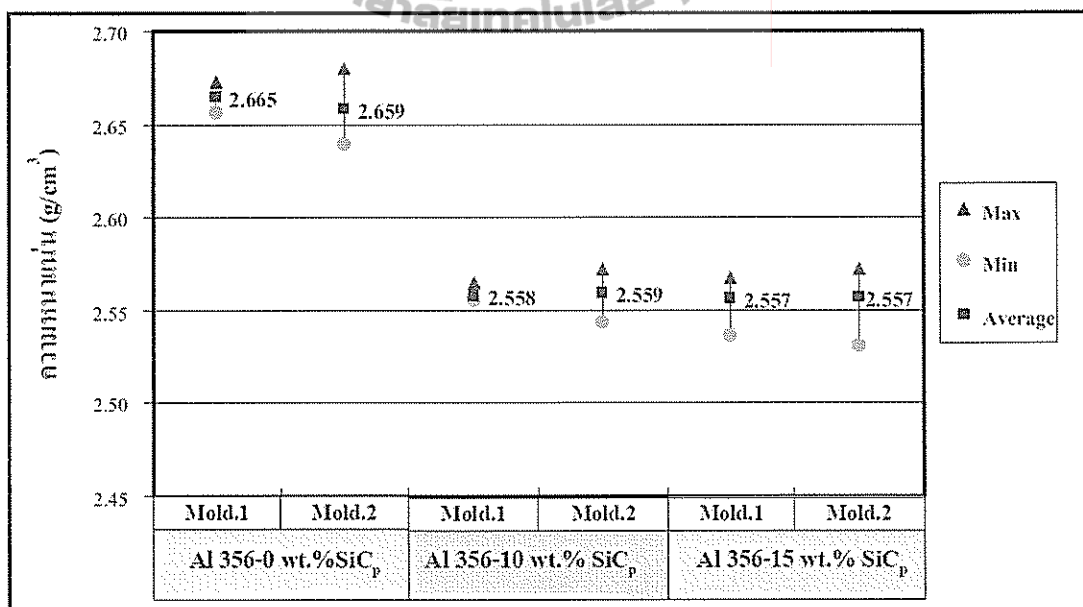
ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมเกรด 356 มีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ 2.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีความมากกว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความหนาแน่นเฉลี่ย ประมาณ 2.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าอะลูมิเนียมลงในวัสดุเชิงประกอบน่าจะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น แต่ผลที่ได้ พบว่าผลจากการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง ซึ่งอาจเกิดเนื่องจาก เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้พอร์รูพูนเพิ่มมากขึ้นในโครงสร้างจุลภาค ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 โดยรูพูนที่เพิ่มขึ้นนี้ จะเป็นสาเหตุทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขการทดลองกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ตามที่ได้นิยามไว้ในสมการที่ 3.3 และได้แสดงผลในรูปแบบร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎี ตามที่ได้นิยามไว้ในสมการที่ 3.6 พร้อมทั้งคำนวณหาปริมาณของรูพูนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ โดยใช้สมการ 3.7 โดยปริมาตรรูพูนภายในชิ้นงานหล่อที่ได้จากการคำนวณนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่รูพูนที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์ร้อยละของความหนาแน่นทางทฤษฎี ผลของการคำนวณปริมาตรรูพูนในชิ้นงานหล่อ และพื้นที่รูพูนจากการวิเคราะห์ภาพ ในรูปที่ 4.16 ซึ่งพบว่าปริมาตรรูพูนที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าพื้นที่รูพูนจากการวิเคราะห์ปริมาณเฟสจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแต่อย่างใดก็ คือ พบว่าผลการวิเคราะห์รูพูนทั้งสองวิธีก็มีความแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และพอที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณปริมาณรูพูนที่ผสมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบ โดยจากผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพูนทั้งสองวิธีดังกล่าว พบว่า เมื่อมีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณรูพูนเพิ่มมากขึ้น

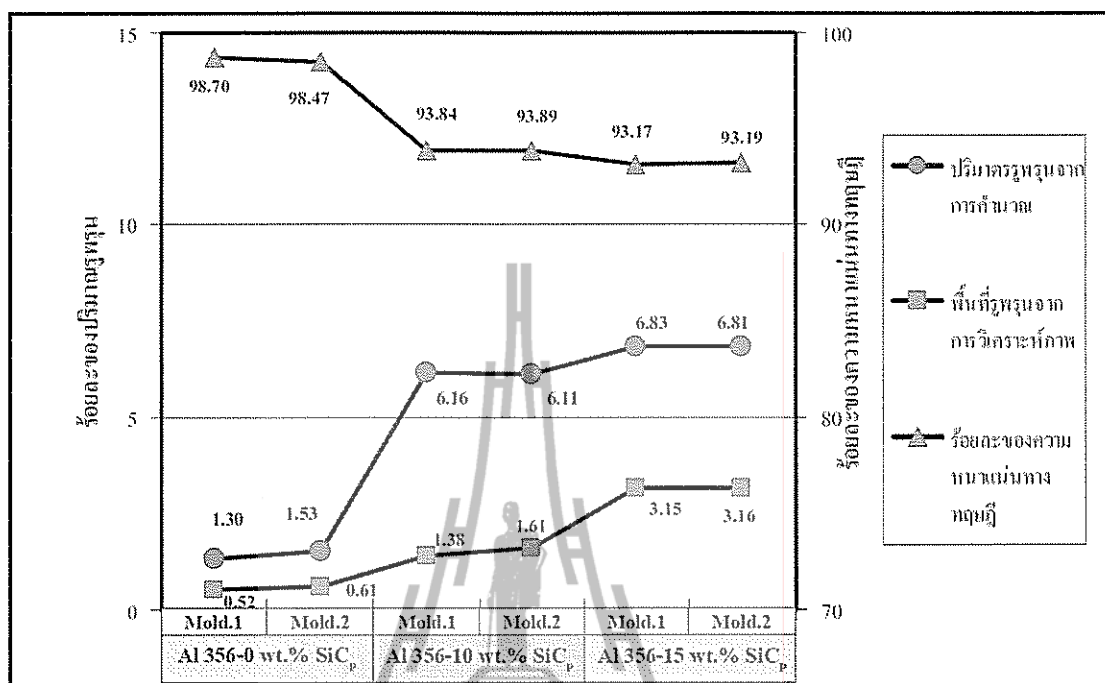
สำหรับการหาปริมาตรรูพูนจากการคำนวณจากสมการที่ 3.7 นั้นอาจจะมีคลาดเคลื่อนได้เมื่อใช้วิเคราะห์วัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ไม่ทราบส่วนผสมอย่างแท้จริง เนื่องจากไม่สามารถหาปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สามารถเข้าไปผสมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบได้อย่างถูกต้อง แต่จากการสังเกตปริมาณการแยกตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์จากน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg จะมีการแยกตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์น้อยดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่

4.2 ดังนั้นการเติม Mg น่าจะเป็นผลให้ซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าไปผสมในวัสดุเชิงประกอบได้ใกล้เคียงกับปริมาณที่เติมลงไป ซึ่งหมายความว่า สำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้ ซึ่งผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติม Mg ร่วมกับ Al-5Ti-B และ Sr ก่อนเทลงแบบหล่อ จะทำให้มีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบด้วยปริมาณที่ใกล้เคียงกับปริมาณที่เติมลงไป ดังนั้นการหาปริมาณรูพรุนจากการคำนวณน่าจะใช้ประมาณรูพรุนได้ใกล้เคียงกับปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นจริงในวัสดุเชิงประกอบ

ส่วนการวิเคราะห์ภาพที่เป็นการวิเคราะห์ปริมาณเฟสในลักษณะสองมิติ ซึ่งสมมุติว่าพื้นที่รูพรุนเท่ากับปริมาตรของรูพรุนโดยพื้นที่รูพรุนที่วิเคราะห์ได้จะเข้าไปใกล้ค่ามาตรฐานของรูพรุนก็ต่อเมื่อรูปร่างรูพรุนเข้าใกล้ทรงกลม แต่เนื่องจากโดยส่วนใหญ่รูพรุนที่เกิดจากก๊าซมักจะเกิดร่วมกับรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวซึ่งมักมีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) เป็นผลให้การวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนจากภาพถ่ายสองมิติมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้ถึงแม้ว่าการสุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจะกระทำถึง 10 ตัวอย่างต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง การวิเคราะห์แบบสองมิติก็อาจมีความคลาดเคลื่อนได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิเคราะห์แบบสามมิติ แต่อย่างไรก็ดีการวิเคราะห์เฟสแบบสองมิติจากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค ก็ให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ปรากฏในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถใช้อธิบายผลของสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบนี้ได้



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ กับปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์

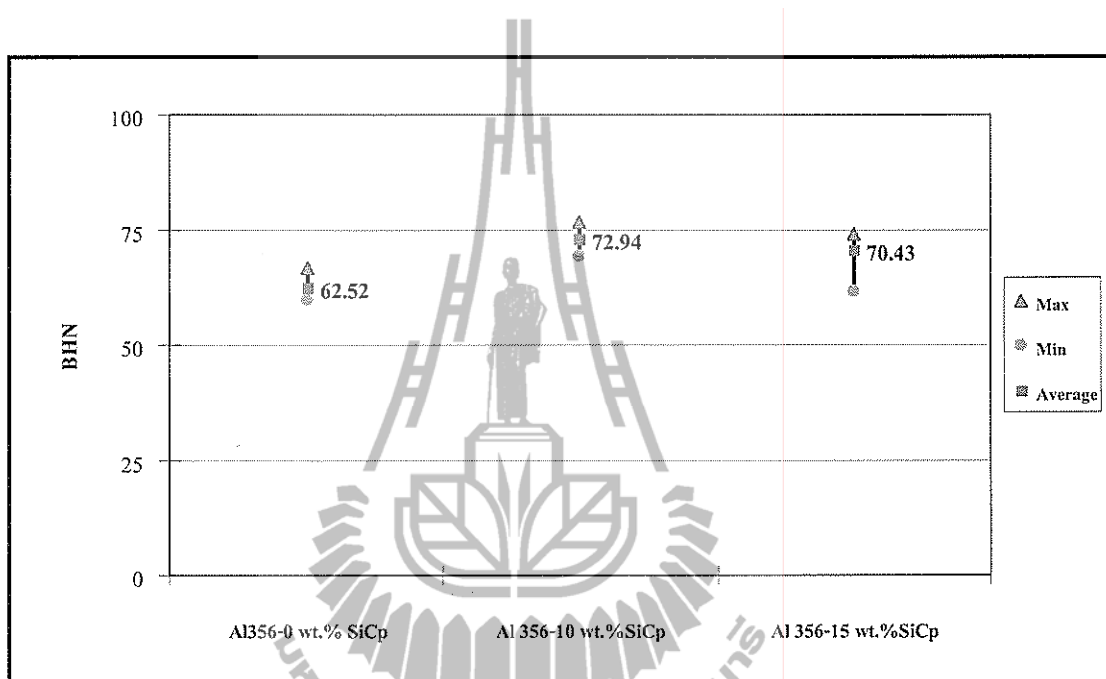


รูปที่ 4.16 แสดงการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนและช่องว่างทางทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบ  
พื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก

#### 4.5 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนล ของชิ้นงานหล่อแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งเฉลี่ยสูงที่สุดในการวิจัยนี้ คือวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ย 72.94 BHN เนื่องจากเงื่อนไขการทดลองนี้มีลักษณะการกระจายตัวที่ดีของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค กอรปกับเงื่อนไขการทดลองนี้พบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก และจำนวนไม่มากกระจายอยู่บ้างในโครงสร้างทางจุลภาค ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ค-ง) ลักษณะดังกล่าวเป็นผลดีต่อสมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.12 จ-ด) ที่พบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่อยู่ร่วมกับรูพรุนเป็นจำนวนมาก นั้นเป็นผลให้ความแข็งเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 70.43 BHN แต่อย่างไรก็ดีการมีซิลิคอน

คาร์ไบด์ผสมในวัสดุเชิงประกอบก็เป็นผลดีต่อสมบัติความแข็ง โดยค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าอะลูมิเนียมเกรด 356 ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 62.52 BHN



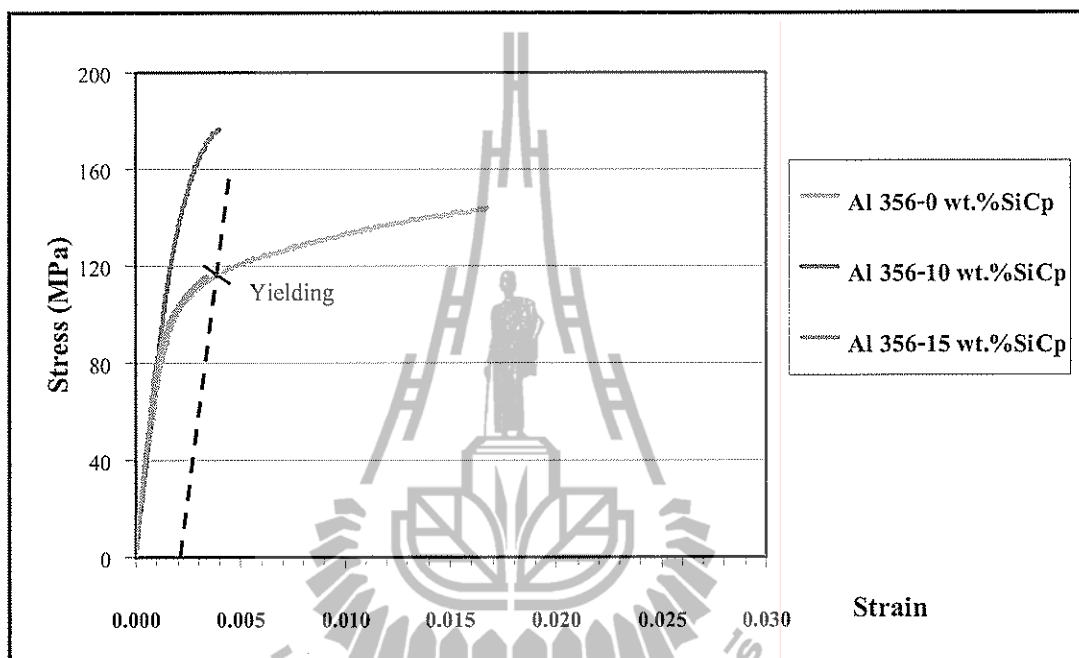
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์

#### 4.6 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

การวิเคราะห์พฤติกรรม การเปลี่ยนรูปภายใต้แรงดึง จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของอะลูมิเนียมเกรด 356 แสดงค่าความเค้นเกินพิกัดความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) และเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) ส่วนพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้นแสดงค่าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูป (Elastic limit) แต่ไม่เกิดการคราก (Yielding) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุได้ว่าการเสริมแรงให้กับอะลูมิเนียมด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีพฤติกรรมแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) แต่อย่างไรก็ดีพบว่าวัสดุ



เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด มากกว่าวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

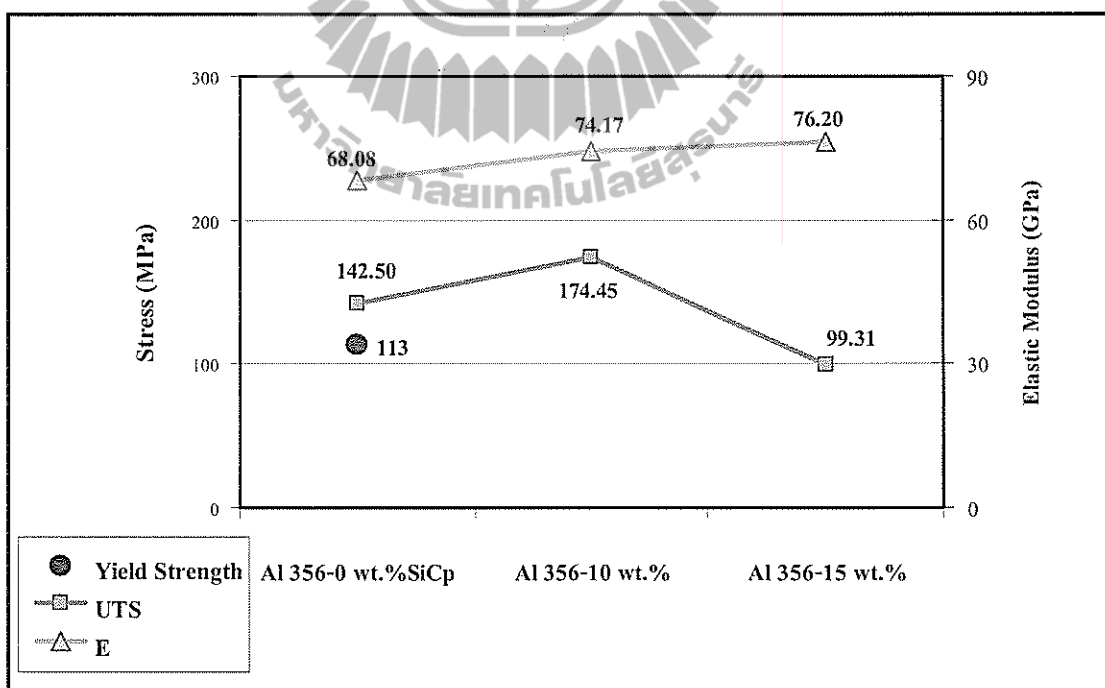


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเค้นความเครียดของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยปริมาณ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบแรงดึง โดยแสดงในรูปแบบของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย และ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 โดยวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 174 MPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีความคาดหวังว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ จะทำให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น แต่ผลที่ได้กลับตรงกันข้าม โดยวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเพียง 99 MPa ซึ่งเป็นค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่มีค่าเท่ากับ 142 MPa น่าจะเป็นผลมาจากปริมาณรูปพรุนที่เพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค

แสดงให้เห็นว่ามีกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ที่มีอยู่ร่วมกับรูพรุนและกระจายอยู่ในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 จ-ฉ) โดยกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อยู่ร่วมกับรูพรุนขนาดใหญ่นี้เปรียบเสมือนจุดอ่อน (Weakness) ในโครงสร้างของชิ้นงานซึ่งเป็นจุดสะสมของความเค้นเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอกทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย

อย่างไรก็ดีในส่วนการวิเคราะห์กราฟความเค้นและความเครียด เพื่อหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ที่แสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงที่สุดในการวิจัยนี้คือ 76 GPa ส่วนของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าโมดูลัสเท่ากับ 74 GPa ซึ่งมากกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 68 GPa แต่ทั้งนี้ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ทั้ง 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักก็ไม่เกินความเค้น ณ จุดคราก ส่วนอะลูมิเนียมผสม เกรด 356 แสดงค่าความเค้น ณ จุดคราก เท่ากับ 113 MPa

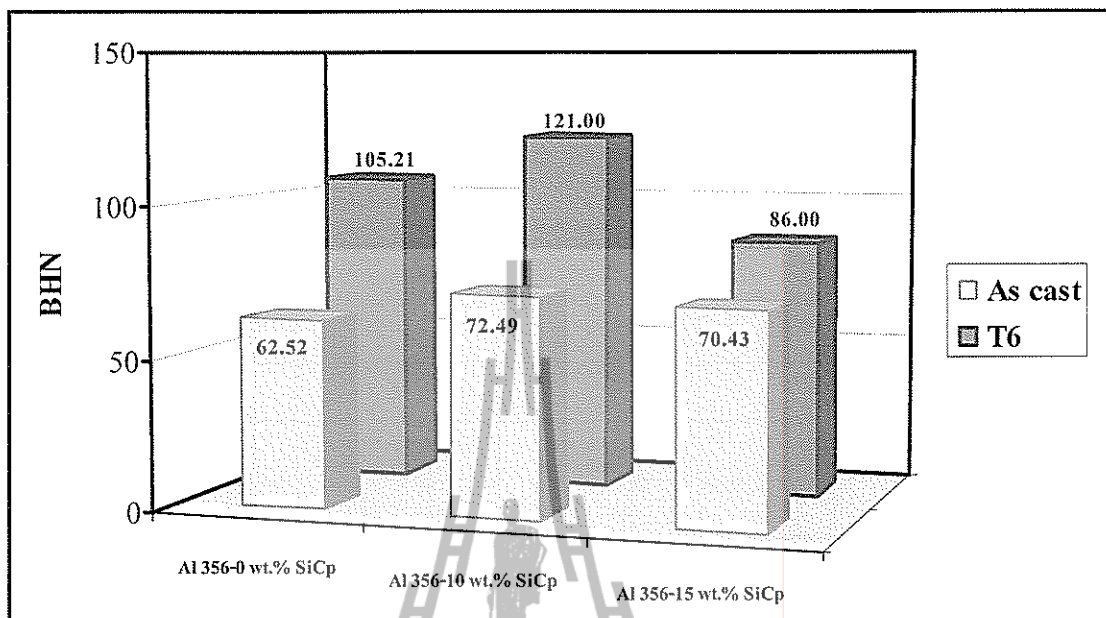


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์

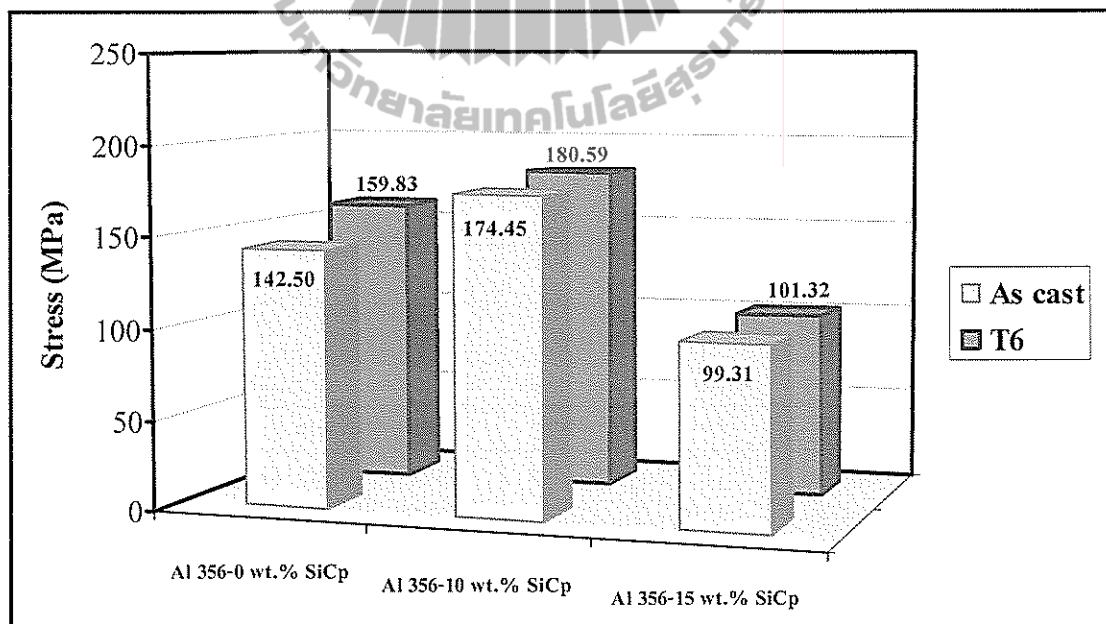
#### 4.7 ผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

สำหรับผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) ต่อสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนของแข็ง ซึ่งเป็นผลดีต่อสมบัติความแข็งแรงอย่างเด่นชัดดังแสดงในรูปที่ 4.20 ส่วนผลกระทบจากกรรมวิธีทางความร้อนต่อสมบัติแรงดึงนั้นให้ผลดีเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.21 แต่มีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของสมบัติความแข็งแรง และเนื่องจากการที่มีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นใน โครงสร้างจุลภาค ทำให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นทั้งจากการวิเคราะห์ปริมาณเฟสตามที่ได้กล่าวไว้ในข้อที่ 4.2 และการหาปริมาตรรูพรุนจากการคำนวณซึ่งได้รายละเอียดแสดงในข้อที่ 4.4 จึงทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมถึงผลกระทบจากปริมาณรูพรุนต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลภายหลังการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยแสดงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยของค่าความแข็งแรง และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบเปรียบเทียบกับปริมาตรรูพรุน โดยเฉลี่ยที่ได้จากคำนวณ แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบทำให้อัตราการเพิ่มของสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเนื่องจากกรรมวิธีทางความร้อนนั้นลดลง โดยค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 23-68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นเพียง 2-12 เปอร์เซ็นต์

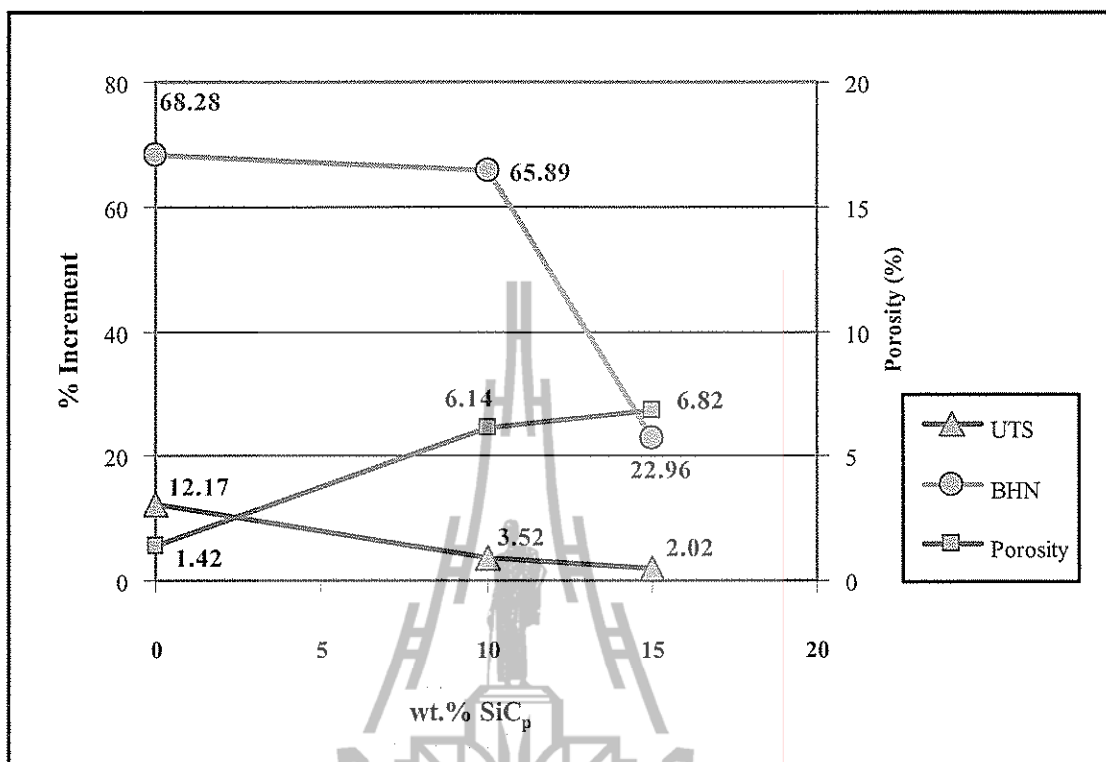
ในส่วนของผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์และผลกระทบจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) ที่มีต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงดึงแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าการปรับปรุงสมบัติเชิงกลภายหลังการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อนนั้น เป็นผลทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นได้เพียงเล็กน้อย แต่มีผลทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น



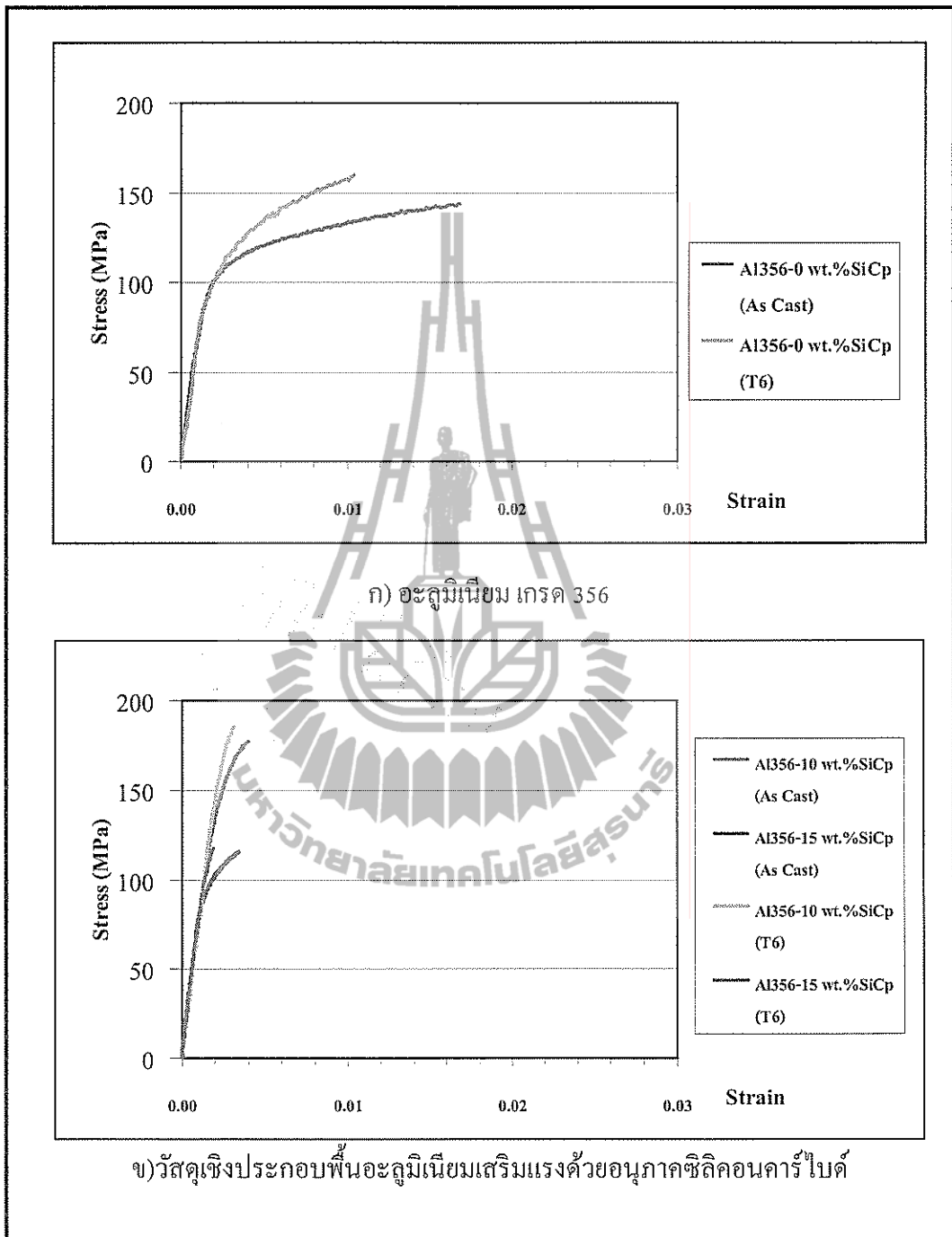
รูปที่ 4.20 แสดงผลกระทบต่อสมบัติความแข็งจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกล  
 ภายหลังจากหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6)



รูปที่ 4.21 แสดงผลกระทบต่อสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกล  
 ภายหลังจากหล่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6)



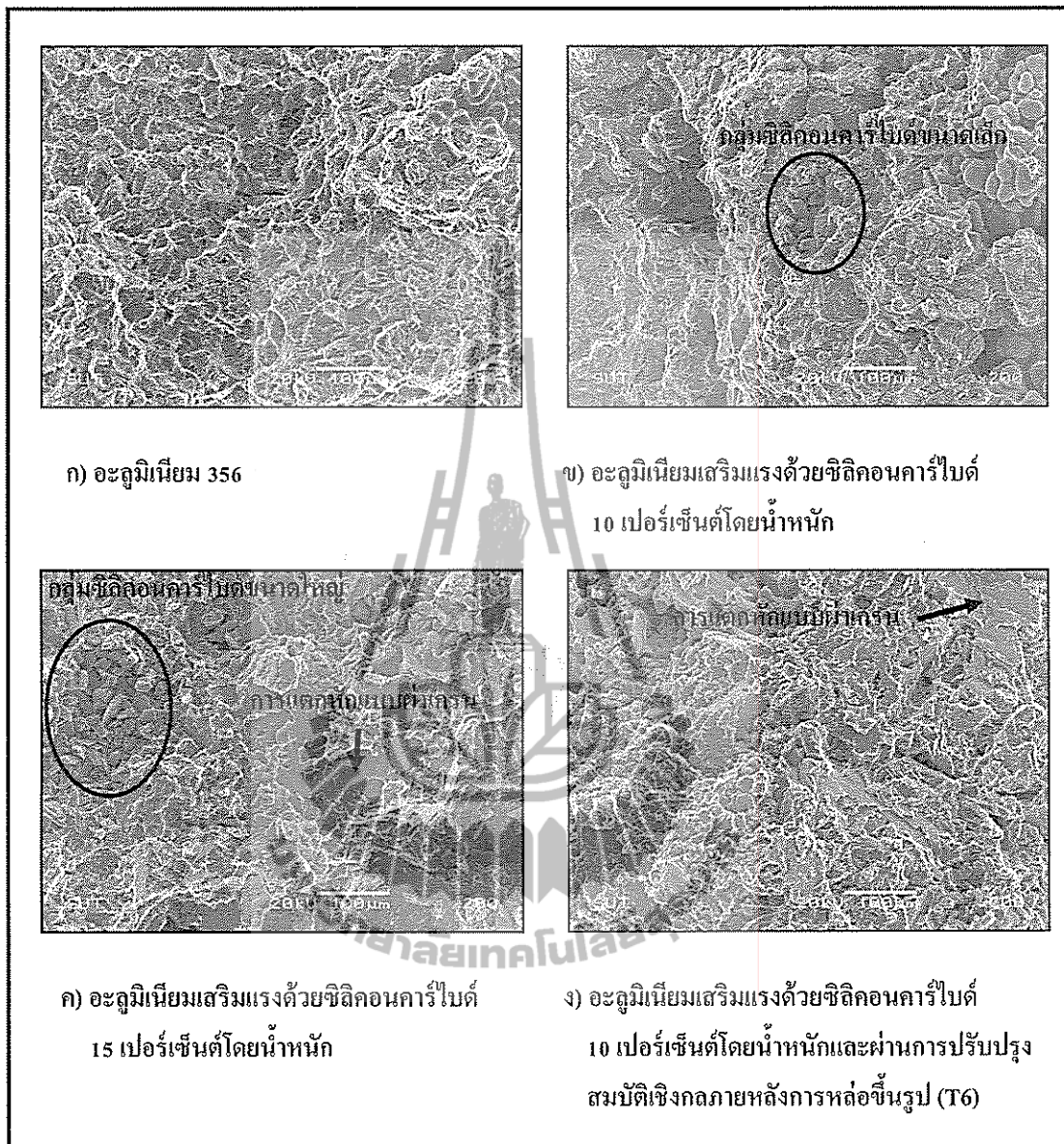
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณรูพรุน  
กับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้น-ความเครียด ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 0 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้รับผลกระทบจากกรรมวิธีทางความร้อน (T6)

#### 4.8 การวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบแรงดึง

การตรวจสอบพื้นที่ผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้แสดงในรูปที่ 4.24-4.27 โดยรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของลักษณะการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบที่มีความแตกต่างกันตามปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เสริมแรง โดยพบว่าชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ไม่เติมเฟสเสริมแรง มีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวเป็นหลัก โดยสังเกตเห็น Microvoid กระจายอยู่ทั่วไปและมีพื้นผิวการแตกหักแบบผ่าเกรนอยู่เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ก) แต่เมื่อเติมซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานหล่อเปลี่ยนแปลงไป โดยมีพื้นผิวการแตกหักแบบผ่าเกรน (Transgranular fracture) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ข) และยังพบพื้นผิวการแตกหักแบบผ่าเกรนเป็นจำนวนมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ค) ซึ่งพบพื้นผิวการแตกหักแบบผ่าเกรนที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่และมีความต่อเนื่องมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ประมาณ 200 ไมโครเมตร กระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวการแตกหัก ซึ่งคาดว่าปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดการสะสมของความเค้นและนำไปสู่การแตกหักแบบเปราะในที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการเสียรูปที่แสดงจากกราฟความสัมพันธ์ ความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งชิ้นงานทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบเกิดการแตกหักก่อนจุดคราก นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (T6) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ง) พบลักษณะการแตกหักแบบผ่าเกรน กระจายอยู่ทั่วไปในพื้นผิวการแตกหัก และมีปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.24 ข) ที่เติมซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณที่เท่ากัน คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

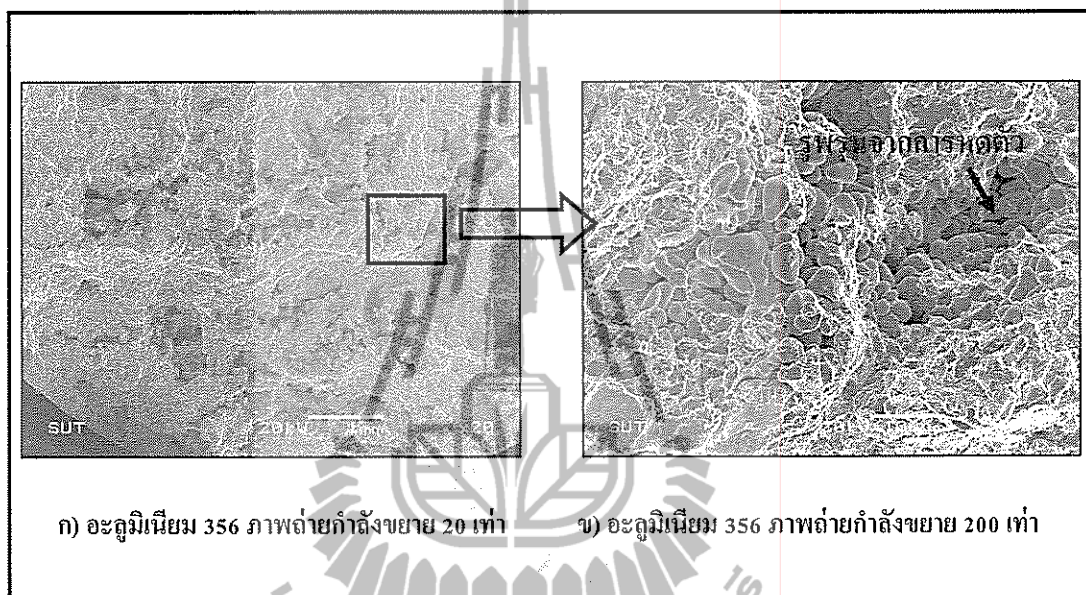


รูปที่ 4.24 แสดงพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบแรงดึงที่แตกต่างกันเนื่องจากปริมาณของ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า

การตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อหาจุดเริ่มต้นของการแตกหักของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม เกรด 356 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่ามีรูพรุนบริเวณขอบเกรนกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวการแตกหัก ซึ่งเป็นรูพรุนจากการหดตัวที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำโลหะที่อุณหภูมิต่ำเกินไป ทำให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวมีค่าความหนืดสูงจนเป็นอุปสรรคในการไหลเข้าไปทดแทนบริเวณที่เกิดการหดตัวเมื่ออะลูมิเนียมเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมการแตกหัก



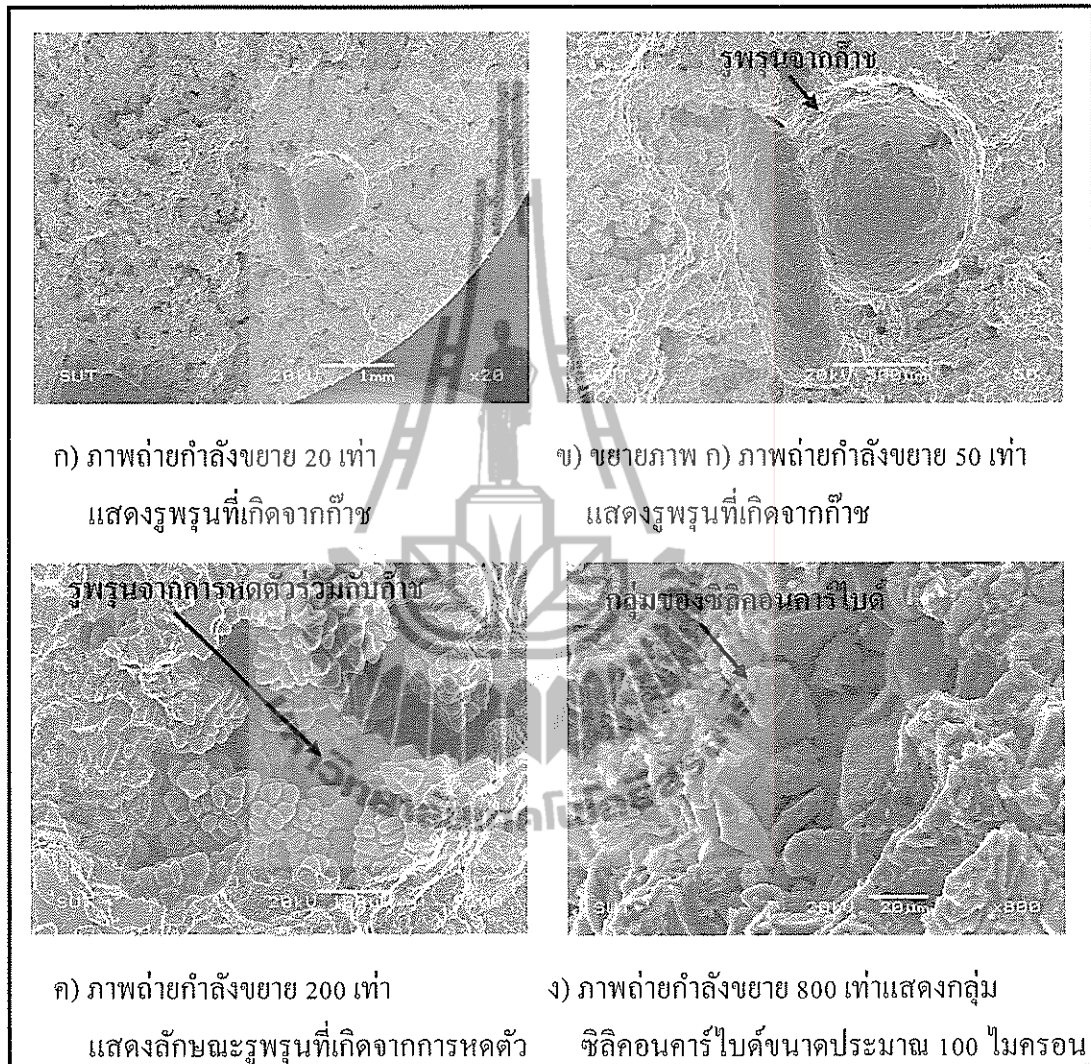
แบบเปราะเกิดร่วมด้วย ทำให้กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียดของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เท่ากับค่าความเค้น ณ จุดแตกหัก ซึ่งยังอยู่ในช่วง Strain hardening จึงไม่พบช่วงที่เป็น Necking ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



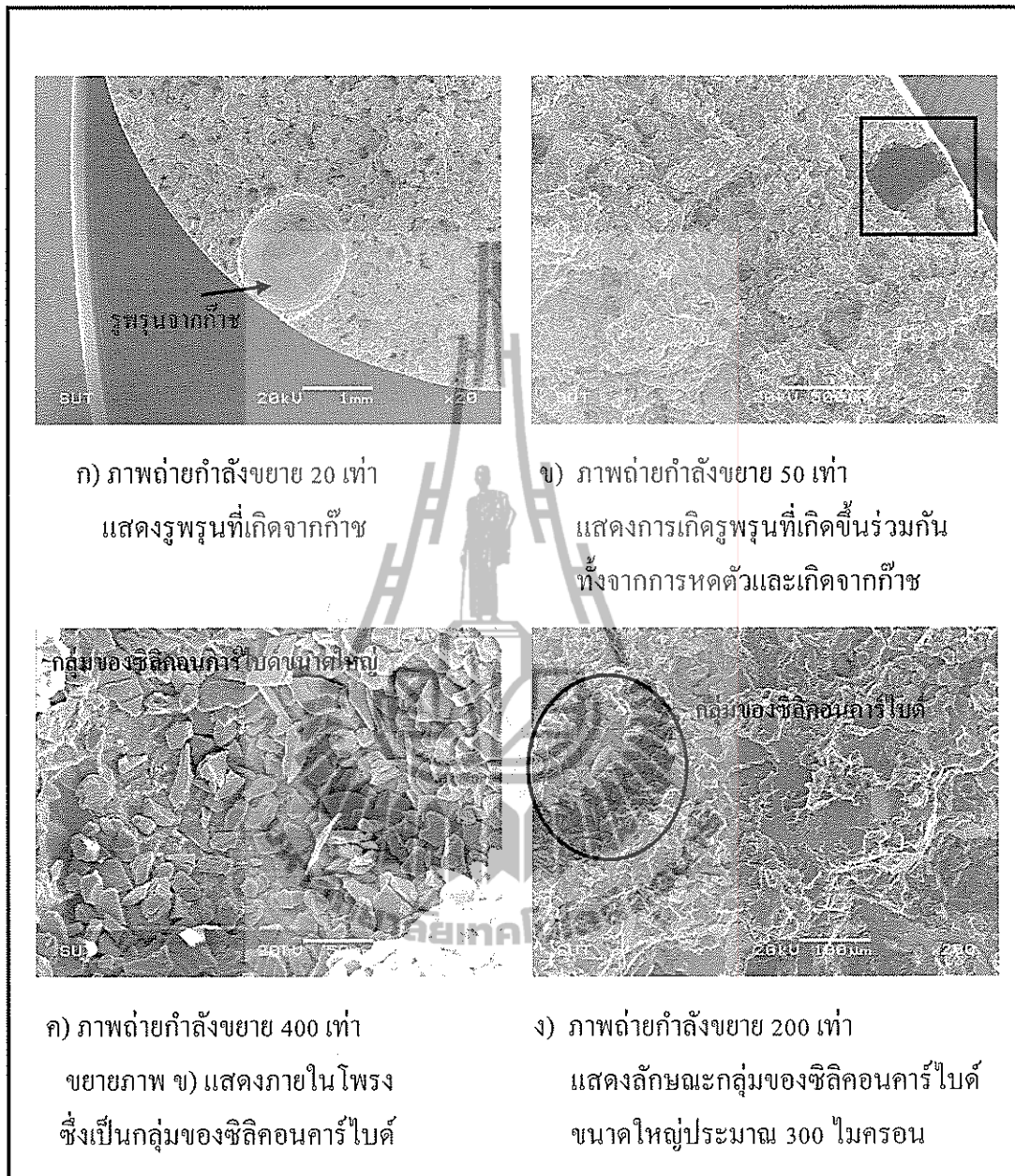
รูปที่ 4.25 แสดงพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียม เกรด 356

สำหรับพื้นผิวการแตกหักภายใต้แรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.26) เป็นภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบรูพรุนจากก๊าซขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร อยู่บริเวณใกล้ผิวชิ้นงานทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ก-ข) ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก และเป็นผลเสียอย่างยิ่งต่อสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ และยังพบรูพรุนจากการหดตัวร่วมกับรูพรุนที่เกิดจากก๊าซ ในรูปที่ 4.26 ค) นอกจากนี้ยังพบว่ามีกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดประมาณ 60 ไมโครเมตร และรูพรุนจากการหดตัวกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ผิวการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ง) สำหรับพื้นผิวการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.27 นอกจากจะพบรูพรุนที่เกิดขึ้นจากก๊าซที่มีขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ก) ยังตรวจพบรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ร่วมกับรูพรุนที่เกิดจากก๊าซ อยู่ร่วมกับกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งมีขนาดใหญ่

ประมาณ 500 ไมโครเมตร แสดงในรูปที่ 4.27 ข-ค) และลักษณะโดยทั่วไปในพื้นผิวการแตกหักยังตรวจพบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดประมาณ 600 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ง)



รูปที่ 4.26 แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.27 แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

## 4.9 การอภิปรายผล

### 4.9.1 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

จากผลการทดลอง ได้แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ให้ผลการทดลองที่ดีเมื่อเติมในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อของโลหะพื้นอะลูมิเนียมเกรด 356 กลไกการเพิ่มความแข็งแรงที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากเติมเฟสที่มีความแข็งแรงกว่าคือซิลิคอนคาร์ไบด์ลงไปอนุภาคขนาดเล็กระดับไมโครเมตรนี้สามารถที่จะช่วยถ่ายโอนแรงกระทำจากโลหะพื้นได้ (Tang, Aaderson, Gnaupel-Herold and Prask, 2004) และสามารถช่วยในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน เป็นผลให้ต้องใช้ความเค้นเพิ่มขึ้นในการทำให้เกิดการเสียรูป แต่จากผลการทดลอง ถึงแม้ว่าการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่จะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการเสริมแรงยังไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณรูพรุนที่พบในเฟสพื้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณเฟสในโครงสร้างจุลภาค พบว่าเมื่อมีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจะพบรูพรุนมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.13 รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อนี้ทำให้เกิดความอ่อนแอในเฟสพื้นที่ได้รับแรง และทำให้การถ่ายโอนแรงไม่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างเฟสเสริมแรงและเฟสพื้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวลดลงเป็นอย่างมาก (Razaghian, Emamy, Najimi and Ebrahimi, 2009) จึงทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเข้าใกล้วัสดุพื้นมากกว่าวัสดุเสริมแรง

ส่วนการเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะพบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่อยู่ร่วมจำนวนรูพรุนจำนวนมากในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกล เนื่องจากการเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นจะเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบก็ต่อเมื่อ ซิลิคอนคาร์ไบด์มีการแยกตัวออกจากกันเป็นอนุภาคเดี่ยวกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างจุลภาคและมีการยึดเกาะกันอย่างสมบูรณ์บริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ แต่จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าซิลิคอนคาร์ไบด์มักอยู่ร่วมกับรูพรุน ทั้งรูพรุนที่เกิดจากก๊าซและรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว ทำให้การยึดเกาะบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างเฟสโลหะพื้นและเฟสเสริมแรงขาดความต่อเนื่องและไม่สมบูรณ์เนื่องจากผิวบางส่วนของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์สัมผัสกับรูพรุนหรือกับซิลิคอนคาร์ไบด์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปริมาณรูพรุนและกลุ่มซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นในโครงสร้างจุลภาคเป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

#### 4.9.2 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อปริมาณรูพรุนในโครงสร้าง

จุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ รูพรุนที่พบในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ทั้งรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว และรูพรุนที่เกิดขึ้นจากก๊าซมักจะอยู่ร่วมกับอนุภาคบริเวณขอบเกรนเนื่องจากกระบวนการแข็งตัวของโลหะ ตามที่ได้กล่าวไว้ในข้อที่ 2.9 โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นต้องมีความเสถียรจึงจะสามารถโตขึ้นและกลายเป็นรูพรุนในชิ้นงานหล่อหลังจากที่กระบวนการแข็งตัวของโลหะเสร็จสิ้น โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ แรงดันของก๊าซ แรงดันของการหดตัว แรงตึงผิวของน้ำโลหะ และขนาดของรูพรุน (John and Bernard,)

รูพรุนที่พบในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบนั้น เป็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวและรูพรุนที่เกิดจากก๊าซ เกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายปัจจัยด้วยกันซึ่งล้วนแต่มีความเกี่ยวข้องกับการทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าไปผสมกับอะลูมิเนียม ได้แก่ การเติมซิลิคอนคาร์ไบด์และการกวนผสม การเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ รูปร่างของซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยจะอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

- รูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์และการกวนผสมนั้น น่าจะเป็นรูพรุนจากก๊าซ เนื่องจากการกวนผสมเป็นปัจจัยที่นำเอาก๊าซเข้าไปผสมกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีอากาศที่อยู่ร่วมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนเทลงแบบหล่อ เนื่องจากซิลิคอนคาร์ไบด์มีความสามารถในการดูดซับอากาศและความชื้นไว้ที่ผิวของอนุภาค (Hashim, Looney and Hashmi, 2001) ถึงแม้ว่าในการวิจัยจะลดความชื้นที่ผิวของซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยการอบด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาเติมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม แต่เนื่องจากการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมด้วยมือนั้นก็ทำให้อากาศและความชื้นปะปนไปกับซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนที่จะผสมกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยจำนวนมากขึ้น ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซและความชื้นเข้าไปผสมกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว และเกิดเป็นรูพรุนจากก๊าซที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและผิวเรียบ ดังที่ตรวจพบในพื้นที่ผิวการแตกหักของชิ้นงานหล่อ

- รูพรุนที่เกิดจากการมีซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นส่วนผสม โดยจากการวิเคราะห์ปริมาณเฟส ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่อพบซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นในโครงสร้างจุลภาคทำให้พบรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยรูพรุนที่พบจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคนี้อาจจะอยู่ร่วมกับซิลิคอนคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน น่าจะเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัว ได้มีรายงานวิจัยพบว่ารูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage porosity) มีโอกาสเกิดได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ เนื่องจากเป็นการเพิ่มสัดส่วนของของแข็ง (Solid fraction) ซึ่งจะทำให้ความหนืดของของผสมที่เป็นโลหะหลอมเหลว (Melt mixture) เพิ่มขึ้น และเป็นอุปสรรคในการขดเขย่น้ำโลหะในกระบวนการแข็งตัว

(Ravi, Amaranathan, Pai and Chakraborty, 2008) และจากการวิเคราะห์แผนภาพสมดุลและการคำนวณด้วยกฎคานงัด (Lever rule) เพื่อหาปริมาณของแข็งในโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 356 ณ อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมในสถานะกึ่งแข็ง (มีซิลิคอนอยู่ 7.43 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) พบว่ามีสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 0.15 โดยประมาณ และมีผลการวิจัยพบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งและมีสัดส่วนของแข็ง 0.15 จะมีค่าความหนืดประมาณ  $1.8 \times 10^{-2}$  Pa.s (Figueredo, Kato and Flemings, 2000) ดังนั้นเมื่อปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นย่อมทำให้ความหนืดของน้ำโลหะผสมก็เพิ่มขึ้นและทำให้การชดเชยน้ำโลหะในกระบวนการแข็งตัวไม่เพียงพอ ทำให้เกิดรูพรุนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนบริเวณขอบเกรน

● รูปร่างของซิลิคอนคาร์ไบด์ เนื่องจากซิลิคอนคาร์ไบด์มีรูปร่างหลายเหลี่ยมหลายมุม (Angular) ดังนั้นการที่ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายอยู่ในน้ำโลหะเป็นจำนวนมากขึ้น ทำให้การชดเชยน้ำโลหะอย่างเพียงพอในกระบวนการแข็งตัวเกิดขึ้นได้ยาก จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดรูพรุนจากการหดตัวในโครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบเกรน (Ravi, Pillai, Amaranathan, Pai and Chakraborty, 2008)

ทั้งนี้ รูพรุนจากก๊าซ และรูพรุนจากการหดตัว อาจเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวหรือร่วมกัน โดยรูพรุนจากการหดตัวอาจเกิดร่วมกับรูพรุนที่เกิดจากก๊าซซึ่งปะปนมากับซิลิคอนคาร์ไบด์หรือก๊าซที่อาจมีอยู่ในโลหะหลอมเหลว แล้วถูกผลึกออกมาขณะเกิดกระบวนการแข็งตัวอยู่บริเวณขอบเกรน (Gruzleski and Closset, 1990) เช่นเดียวกันกับซิลิคอนคาร์ไบด์

#### 4.9.3 ผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอน

คาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

การเพิ่มปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์นอกจากจะเป็นสาเหตุให้พบรูพรุนมากขึ้นแล้ว ในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยังพบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ ( $\text{SiC}_p$ -Cluster) ขนาดใหญ่จำนวนมากในโครงสร้างทางจุลภาค น่าจะมีสาเหตุมาจากการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่ใช้สภาวะการกวนผสมเช่นเดียวกันกับการผลิตวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้การกวนผสมไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแยกซิลิคอนคาร์ไบด์ออกจากกัน โดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นอุปสรรคในการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกวนผสมยังมีความแตกต่างกันตามตำแหน่งภายในเป่าหลอม (Tzantiz, Barekar, Hari BaBu, Patel, Dhindaw and Fan Z, 2008) โดยบริเวณที่ห่างจากใบพัดย่อมมีประสิทธิภาพในการกวนผสมลดลง ดังนั้นการใช้ความเร็วและเวลาในการกวนผสมก่อนเทลงแบบหล่อเช่นเดียวกับการผสมวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอน

คาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงอาจไม่เป็นสภาวะการกวนที่เหมาะสมสำหรับการหล่อวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากปัจจัยที่กล่าวมา ทั้งปัญหาจากการหดเซยน้ำโลหะในกระบวนการแข็งตัวในขณะที่ความหนืดเพิ่มขึ้นและการขาดวงการหดเซยน้ำโลหะเนื่องจากรูปร่างของซิลิคอนคาร์ไบด์ รวมถึงประสิทธิภาพในการกวนผสม ไม่เพียงพอในขณะที่ความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ ทำให้พบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่อยู่ร่วมกับรูพรุนทั้งที่เกิดจากก๊าซ และรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวในโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งลักษณะดังกล่าวย่อมไม่เป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

นอกจากนี้การที่พบกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่อยู่ตามขอบเกรนอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ดังนั้นในขณะที่ชิ้นงานได้รับแรงดึง จะทำให้เกิดการสะสมของดิสโลเคชัน (Dislocation pile-up) ณ บริเวณขอบเกรนดังกล่าว จึงทำให้เกิดการแตกหักแบบผ่าเกรน (Transgranular fracture) เป็นบริเวณกว้าง ลักษณะการแตกหักแบบผ่านเกรนนี้เป็นพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุเปราะ (Min, 2009) ซึ่งจากการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักภายใต้แรงดึงพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เสริมแรงเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.18 ค) ก็พบการแตกหักแบบผ่านเกรนมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.18 ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความเปราะมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ไม่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์แสดงในรูปที่ 4.18 ก) ซึ่งตรวจพบ Microvoid กระจายอยู่ร่วมกับลักษณะการแตกหักแบบผ่าเกรนบนพื้นผิวการแตกหักลักษณะดังกล่าวเป็นพฤติกรรมการแตกหักของโลหะที่มีการเสียรูปก่อนแตกหักหรือมีความเหนียวมากขึ้น (Min, 2009)

#### 4.9.4 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าทางทฤษฎี

ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์นั้น มีความคาดหวังว่าจะสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับวัสดุเชิงประกอบ แต่อย่างไรก็ดีสมบัติที่ได้มักมีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีตามกฎของการผสม (Rule of mixture) สำหรับในการวิจัยนี้ได้ตรวจสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ ความหนาแน่น ความแข็ง ค่าความเค้น ณ จุดพิักการคืนรูป (Elastic limit) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ทั้งนี้ได้แสดงสมบัติที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีในรูปที่ 4.28-4.31

โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี แสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีตามกฎของการผสม

ที่คำนวณ โดยใช้สมการที่ 4.1 แต่เมื่อนำปริมาตรของรูพรุนมาคำนวณร่วมด้วย ตามสมการที่ 4.2 พบว่ามีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งแสดงว่าความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการทดลองและค่าทางทฤษฎีนั้นน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจาก การเกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบเพียงปัจจัยเดียว ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความหนาแน่น เป็นสมบัติของวัสดุที่ขึ้นกับน้ำหนักและปริมาตรของส่วนผสมที่มีอยู่ในวัสดุเท่านั้น

$$\rho_{composite} = \rho_{SiC_p} V_{SiC_p} + \rho_{Matrix} V_{Matrix} \quad (4.1)$$

$$\rho_{including\ porosity} = (1 - V_{porosity}) (\rho_{SiC_p} V_{SiC_p} + \rho_{Matrix} V_{Matrix}) \quad (4.2)$$

เมื่อ

$\rho_{composite}$  = ความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical Density) ของวัสดุเชิงประกอบ

$\rho_{including\ porosity}$  = ความแน่นที่คิดปริมาตรรูพรุนเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบ

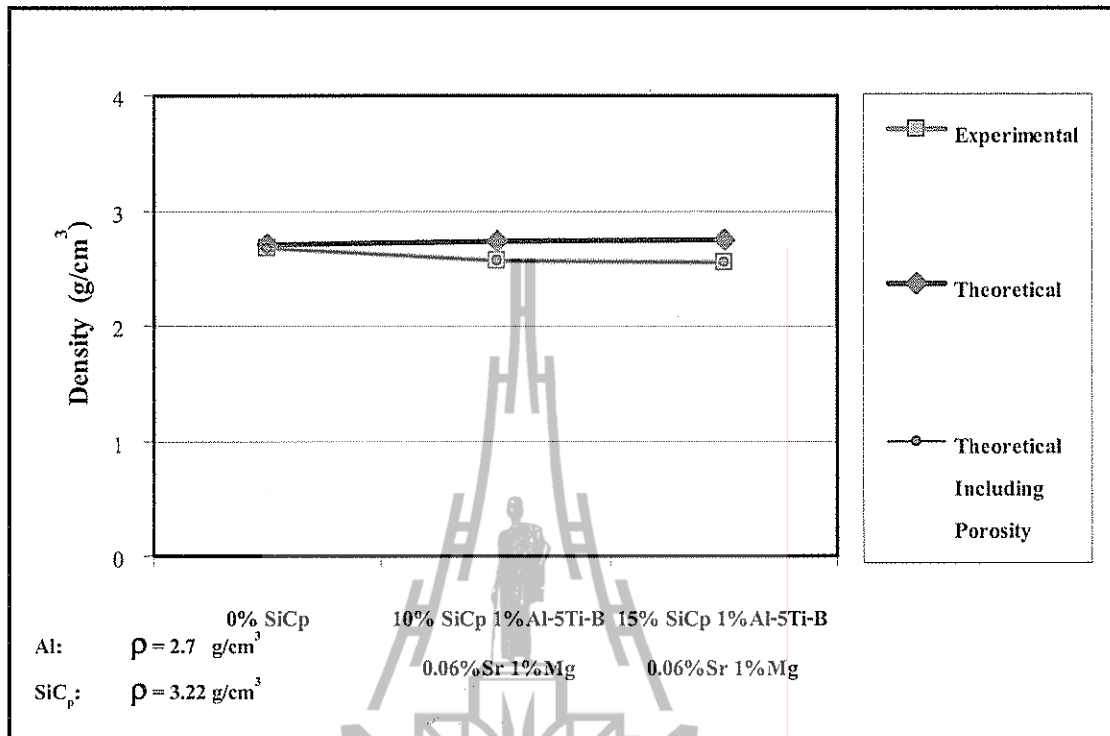
$V_{porosity}$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุน

$V_{SiC_p}$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงในวัสดุเชิงประกอบ (วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า  $V_{SiC_p}$  เท่ากับ 0.075 และ 0.109 ตามลำดับ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.7)

$V_{Matrix}$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสพื้นของวัสดุเชิงประกอบ (แสดงในตารางที่ 3.7)

$\rho_{Matrix}$  = ความหนาแน่นของเฟสพื้น (แสดงในตารางที่ 3.7)





รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบและค่าทางทฤษฎี

สำหรับการเปรียบเทียบสมบัติความแข็งที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าการเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติความแข็งให้กับวัสดุเชิงประกอบ แต่ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีเป็นค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าจะพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากการมีรูพรุนเข้าไปเป็นส่วนผสมแล้วก็ตาม คาดว่าเป็นผลมาจากการที่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นอนุภาคเซรามิกขนาดเล็กและความแข็งสูงกระจายตัวอยู่ในเฟสพื้นอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งน้อยกว่าค่อนข้างมาก เมื่อได้รับแรงกดถึงแม้ว่าซิลิคอนคาร์ไบด์จะไม่เกิดเปลี่ยนรูปแต่จะเกิดการถ่ายเทแรงไปยังอะลูมิเนียมที่อ่อนกว่าซึ่งจะเป็นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ได้มีรายงานวิจัย (Kim, 2000) แสดงให้เห็นว่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นและเป็นไปตามกฎของการผสมนั้นเป็นค่าสูงสุดที่สุดจะเป็นไปได้ทางทฤษฎี ดังแสดงในสมการที่ 4.3 แต่อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาถึงค่าความแข็งที่ต่ำที่สุดที่จะเป็นไปได้ ดังสมการที่ 4.4 และจากผลเฉลยในสมการที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นได้ต่ำสุดของวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับสมบัติความแข็งของเฟสโลหะพื้นที่มีความแข็งต่ำ และสัดส่วนโดยปริมาตรของโลหะพื้นและของเฟสเสริมแรง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเฟสเสริมแรงค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น สำหรับการวิจัยนี้ ค่าความแข็งที่จะเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.5 เมื่อเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีสัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.075 (แสดงในตารางที่ 3.6) ซึ่งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นได้ต่ำสุด คือ

64.86 BHN ส่วนวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสัดส่วนโดยปริมาตร เท่ากับ 0.109 (แสดงในตารางที่ 3.6) จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นได้ต่ำสุดคือ 67.34 BHN ซึ่งจากผลการทดสอบจะพบว่าค่าความแข็งที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่าค่าความแข็งที่ต่ำที่สุดทางทฤษฎีที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3

ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นได้สูงสุดของวัสดุเชิงประกอบตามกฎของการผสม;

$$\bar{H}_{up} = f_h H_h + f_s H_s \quad (4.3) \text{ (Kim)}$$

ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นได้ต่ำสุดของวัสดุเชิงประกอบ;

$$\bar{H}_{low} = \left( \frac{f_h}{H_h} + \frac{f_s}{H_s} \right)^{-1} \quad (4.4) \text{ (Kim)}$$

$$\bar{H}_{low} = \left( \frac{H_h H_s}{H_s f_h + H_h f_s} \right) \text{ เมื่อ } H_s \gg H_h \text{ และ } f_h \gg f_s \text{ แล้ว } H_s, f_h \text{ จะมีค่าน้อยมาก}$$

$$\bar{H}_{low} = \left( \frac{H_s}{f_s} \right) \quad (4.5) \text{ (Kim)}$$

โดยที่

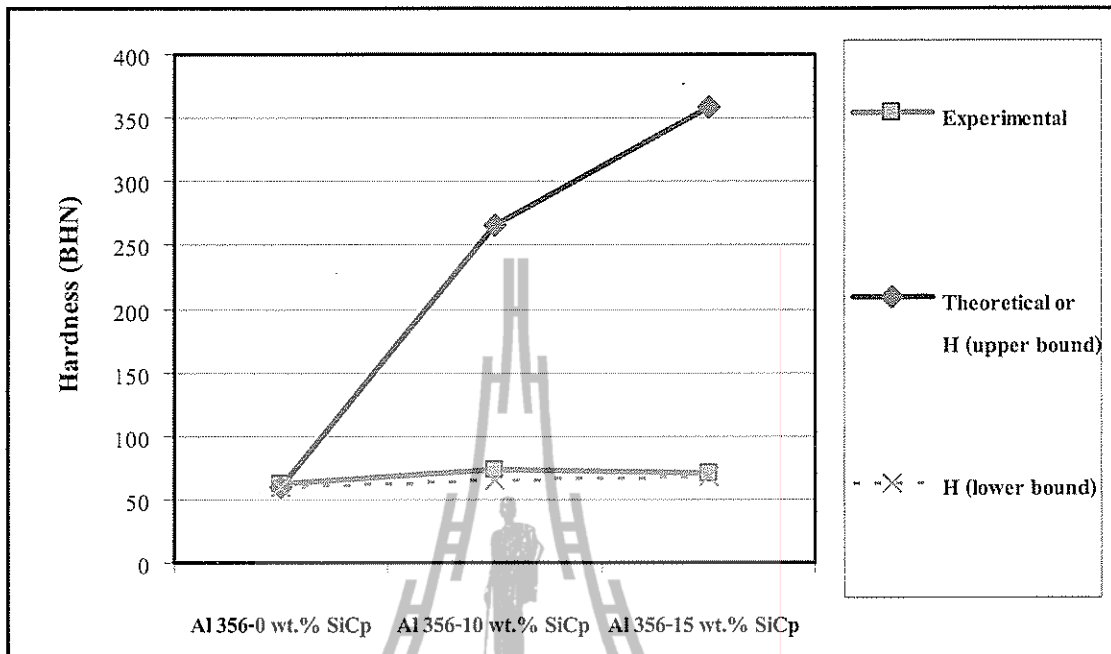
$\bar{H}_{up}, \bar{H}_{low}$  = ค่าความแข็งสูงสุดและต่ำสุดที่เป็นไปได้ทางทฤษฎี

$H_h, H_s$  = ค่าความแข็งของเฟสเสริมแรงและค่าความแข็งของเฟสพื้น

$f_h, f_s$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสเสริมแรงและสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสพื้น

ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 356 เท่ากับ 60 BHN (MRT Casting, www, 2011)

ค่าความแข็งของซิลิคอนคาร์ไบด์ เท่ากับ 2800 BHN (Accuratus Ceramic Corporation, www, 2010)



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบและค่าทางทฤษฎี

การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎีแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองมีความแตกต่างกับค่าทางทฤษฎีเป็นอย่างมาก โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นทางทฤษฎี ตามกฎของการผสม แสดงในสมการที่ 4.6

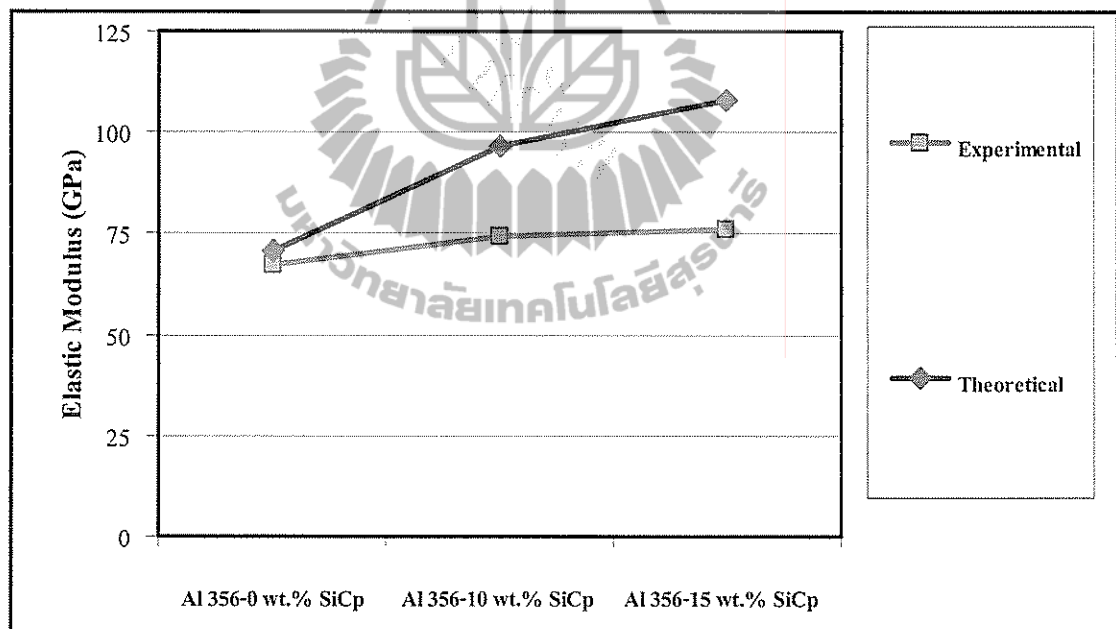
$$E_{composite} = E_{SiC_p} V_{SiC_p} + E_{Matrix} V_{Matrix} \quad (4.6)$$

โดยที่

- $E_{composite}$  = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นทางทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบ
- $E_{SiC_p}$  = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ทางทฤษฎีของซิลิคอนคาร์ไบด์
- $E_{Matrix}$  = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ทางทฤษฎีของอะลูมิเนียม
- $V_{SiC_p}$  = สัดส่วน โดยปริมาตรของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงในวัสดุเชิงประกอบ
- $V_{Matrix}$  = สัดส่วน โดยปริมาตรของเฟสพื้นอะลูมิเนียมในวัสดุเชิงประกอบ

ซึ่งถึงแม้จะมีรายงานการวิจัยพบว่าการเสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิกจะเพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบ แต่กลไกการเพิ่มของค่าความแข็งแรงนั้น ไม่ได้ขึ้นกับสมบัติและสัดส่วนของการผสมเพียงอย่างเดียว ยังต้องพิจารณาผลที่มาจากปริมาณและขนาดของรู

พอรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งรายงานวิจัยที่ระบุว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นตามกฎของการผสมแต่ก็ได้รับผลกระทบเมื่อมีปริมาณพอรุนเพิ่มขึ้นในชิ้นงาน (Rauber, Lohmüller, Opel and Singer, 2011) นอกจากนี้ความต่อเนื่องบริเวณอินเตอร์เฟซ (Interface) ระหว่างอนุภาคเสริมแรงกับเฟสพื้นก็ปัจจัยที่สำคัญต่อสมบัติแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงเกิดจากการถ่ายเทแรงจากวัสดุพื้นหลักไปยังวัสดุเสริมแรงด้วยความเค้นเฉือนบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างเฟสพื้นและเฟสที่เสริมแรง (Tang, Aaderson, Gnaupel-Herold and Prask, 2004) นอกจากนี้ความไม่ต่อเนื่องของอินเตอร์เฟซจะเป็นผลเสียต่อสมบัติแรงดึงแล้ว การสร้างพันธะที่ไม่แข็งแรงบริเวณอินเตอร์เฟซ (Weak interfacial bonding) ระหว่างเฟสพื้นและเฟสเสริมแรงก็เป็นผลเสียต่อสมบัติแรงดึง (Razaghian, Emamy, Najimi and Ebrahimi, 2009) และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในยึดเหนี่ยวระหว่างสองเฟสลดลง ซึ่งเป็นผลเสียต่อสมบัติเชิงกลและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบและค่าทางทฤษฎี

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยในขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสมต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการเติม Mg 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับ Al-5Ti-B 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Sr 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ช่วยทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอในโครงสร้างจุลภาค ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็ง และความแข็งแรงที่ดี

สำหรับผลการวิจัยในขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบนั้น พบว่าวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสมบัติความแข็ง และความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยมีค่าเท่ากับ 72.94 BHN และ 174.45 MPa ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ใช้ความเร็ว และเวลาในการกวนผสมเท่าเดิมนั้น พบว่าในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีลักษณะกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ที่อยู่ร่วมกับรูพรุนกระจายอยู่ในโครงสร้างจุลภาคเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น ความแข็ง และความแข็งแรงดึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

## รายการอ้างอิง

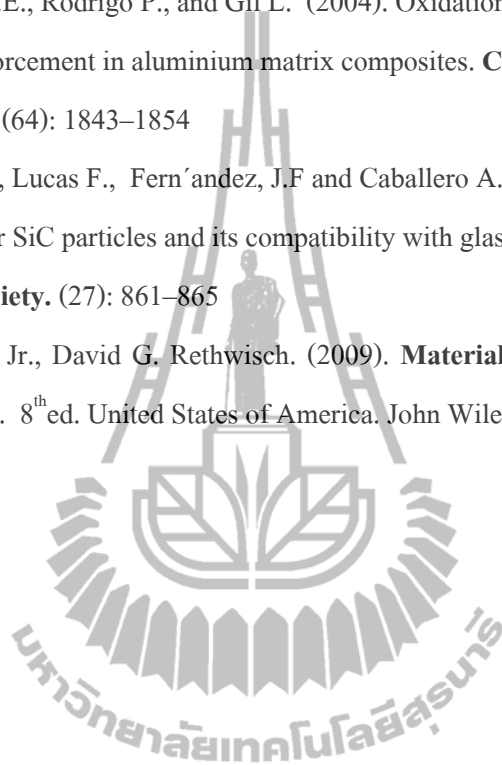
- กิตติพงษ์ กิมะพงษ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนินท์ มีมนต์ และ นรพร กลั่นประชา. (2553). **วัสดุวิศวกรรมกรรม**. กรุงเทพฯ. เซนเกจ เลิร์นนิ่ง (ประเทศไทย) จำกัด.
- จิตร์รัตน์ ชีระพรกุล. (2548). **การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม และ อะลูมินา-นิกเกิล โดยการเผาผนึกแบบไม่ใช้ความดัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มนัส สติระจินดา. (2536). **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก**. กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช สุนธิเกียรติพงษ์. (2541). **วัสดุในงานวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- เขาวลิต ลีम्मณีวิจิตร. **โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ**. หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางหล่อโลหะ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เขาวลิต ลีम्मณีวิจิตร สาริต จันทนป้อม ประมาณ กุสม้อย และ ไชยยุทธ โพธิ์เจริญ. (2546). **ผลของสตรอนเทียมและอัตรการเย็นตัว ต่อโครงสร้างยูเทคติกของซิลิกอนในงานหล่ออะลูมิเนียมผสมเกรด 356**. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2546.
- รุ่งอรุณ บุญถ่าน. (2553). **รายงานผลการทดลองเบื้องต้นในการหาผลกระทบจากเวลาและความเร็วในการกวนผสมขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื่นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์**. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์. (2548). **วัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรมพื้นฐาน**. กรุงเทพฯ : ท้อป.
- Abedi K, and Emamy M. (2010). The effect of Fe, Mn and Sr on the microstructure and tensile properties of A356–10% SiC composit. **Materials Science and Engineering A**. (527): 3733–3740
- Ali Kalkanlı and Sencer Yılmaz. (2008). Synthesis and characterization of aluminum alloy 7075 reinforced with silicon carbide particulates. **Materials and Design**. (29): 775-780
- Accuratus Ceramic Corporation. (2010). **Silicon Carbide Material Properties** [On-line]. Available: <http://accuratus.com/pdf/sicprops.pdf>

- Balasivanandha Prabu, Karunamoorthy S., Kathiresan L. and Mohanb B. (2006). Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite **Journal of Materials Processing Technology**. (171): 268–273
- Chawla, K.K. (1993). **Cermic matrix composites**. London ; New York. Chapman & Hall.
- Chawla, K.K. (2003). **Cermic matrix composites**. 2<sup>nd</sup> ed. Boston. Kluwer Academic Publishers.
- Courtney, Thomas H. (1990). **Mechanical behavior of materials**. McGraw-Hill. Singapore.
- Donna L, Zalensas. (2001). **Aluminum Casting Technology**. American Foundry Society Des Plaines. Illinois.
- Emamy. M., Razaghian.A., Lashgari .H.R., and Abbasi R. (2008). The effect of Al–5Ti–1B on the microstructure, hardness and tensile properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC-containing metal–matrix composites. **Materials Science and Engineering A**. (485):210–217
- Figueredo de A.M., Kato A., and Flemings M. C.. (2000). Viscosity of semi-solid a357 alloy in the transient high shear rate regime. **Metallurgical Science and Technology**. vol.18 (2): 32-36
- Garcia-Hinojosa J.A., Gonz'alez R .C., Ju'arez I. J.A., Surrapa M.K. (2004). Effect of grain refinement treatment on the microstructure of cast Al–7Si–SiC<sub>p</sub> composites. **Materials Science and Engineering A**. (386): 54–60
- Garcia-Hinojosa J.A., Gonz'alez R .C., Ju'arez I. J.A., Surrapa M.K. (2004). Effect of Sr addition on an Al–7Si–10 vol.% SiC<sub>p</sub> cast composites. **Materials Science and Engineering A**. (382): 315–320
- Hashim,J, Looney.L and Hashmi.M.S.J. (2001). The wettability of SiC<sub>p</sub> particles by molten aluminium alloy. **Materials processing research centre**. Dublin City University. Dublin. Ireland.
- Hashim,J, Looney.L and Hashmi.M.S.J. (1999). Metal matrix composites: production by the stir casting method. **Journal of Materials Processing Technology**. (92-93): 1-7
- Jae-Chul Lee, Jae-Pyoung Ahn, Jae-Hyeok Shim<sup>1</sup>, Zhongliang Shi<sup>1</sup> and Ho-In Lee. (1999). Control of The Interface in SiC/Al Composite. **Scripta Materialia**. (41): 895–900
- John E. Gruzleski and Bernard M. Closset. (1990). **The treatment of liquid aluminum-silicon alloys**. American foundrymen's Society. Inc. USA. 149-152
- Kim Hyoung Seop. (2000). On the rule of mixture for the hardness of particle reinforced composite. **Materials Science and Engineering A**. (289): 30-33

- Lashgari H.R., Emamy M., Razaghian A. and Najimi A.A. (2009). The effect of strontium on the microstructure, porosity and tensile properties of A356–10%B<sub>4</sub>C cast composite. **Materials Science and Engineering A.** (517): 170–179
- Polmer I.J. (2006). **Light Alloys from traditional alloys to nanocrystals.** 4<sup>th</sup> ed. United Kingdom. Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Ravi K.R., Pillai R.M., Amaranathan K.R., Pai B.C. and Chakraborty M. (2008). Fluidity of aluminum alloy and composite: A review. **Journal of Alloys and Compounds.** (456): 201-210
- Rauber C., Lohmüller A., Opel S. and Singer R.F. (2011). Microstructure and mechanical properties of SiC particale reinforced magnesium composite processed by injection molding. **Materials Science and Engineering A.** (528): 6313-6323
- Razaghian A., Emamy M, Najimi A.A. and Seyed Ebrahimi S.H. (2009). Sr effect on the microstructure and tensile properties of A357 aluminum alloy and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC-A357 cast composites. **Materials characterization.** (60): 1361-1369
- Samuel A.M., Gotmare A. and Samuel F.H. (1995). Effect of solidification rate and metal feed ability on porosity and SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particle Distribution in an Al-Si-Mg (359) alloy. **Composites Science and Technology.** (53): 301-315
- Smallman R. E. and Bishop R. J. (1999). **Modern Physical Metallurgy And Materials Engineering.** 6<sup>th</sup> ed. Jordan Hill. Oxford. Elsevier Science Ltd.
- Schwartz Mel M. (1996). Composite Materials volume I. Upper Saddle River. New Jersey. Prentice-Hall.
- Tamer Ozben, Erol Kilickap, Orhan Çakır. (2008). Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. **Journal of Materials Processing Technology.** (198): 220–225
- Tang Fei, Aaderson Tver E, Gnaupel-Herold Thomas and Prask Henry. (2004). Pure Al matrix composite produced by vacuum hot pressing: tensile properties and strengthening mechanisms. **Materials Sicence and Engineering A.** (383): 362-373
- Tzantiz S., Barekar N.S., Hari BaBu N., Patel J., Dhindaw B.K. and Fan Z. (2008). Processing of advanced Al/SiC particulate metal matrix composites under intensive shearing – A novel Rheo-process. **Composite: Part A.** (40): 144-151



- Min Song. (2009). Effects of volume fraction of SiC particle on mechanical properties of SiC/Al composites. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China.** (19): 1400-1404
- MRT casting. (2011). **Aluminum Casting Alloy LM25** [On-line]. Available: <http://www.mrt-castings.co.uk/aluminium-alloy-lm25.html>
- Urena A., Martinez E.E., Rodrigo P., and Gil L. (2004). Oxidation treatments for SiC particles used as reinforcement in aluminium matrix composites. **Composites Science and Technology.** (64): 1843–1854
- Villegas M., Sierra T., Lucas F., Fern´andez, J.F and Caballero A.C. (2007). Oxidation treatments for SiC particles and its compatibility with glass. **Journal of the European Ceramic Society.** (27): 861–865
- William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch. (2009). **Materials science and engineering an introduction.** 8<sup>th</sup> ed. United States of America. John Wiley & Sons.





ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

## รายชื่อผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. Roongarun Buntan, Daraporn Phuenchomphu, Peeradecc Sukmoung, Kanjana Doomao, Oat Auunnapiwat and Tapany Udampol. **Mechanical Properties of Stri-Mixed  $\text{SiC}_p$ -Reinforced Aluminium Composite**. การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4 17-19 พฤศจิกายน 2553. เขาใหญ่ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

2. รุ่งอรุณ บุญถ่าน และฐาปนีย์ อุดมผล, ผลกระทบจากการเติม  $\text{Al-5Ti-B}$  Sr และ Mg ต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2554. 31-38



### Mechanical Properties of Stir-Mixed SiC<sub>p</sub>-Reinforced Aluminium Composites

Roongarun Buntan\*, Daraporn Phuenchomphu\*\*, Peeradech Sukmoung\*\*, Kanjana Doomao\*, Oat Anunawat\*\*, Tapany Udomphon\*\*\*

\*Graduate Program in Metallurgical Engineering (MEng), \*\*Undergraduate Program in Metallurgical Engineering (BEng), \*\*\*Lecturer at Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology

E-mail: cru@sut.ac.th, Tel : 08-0729-1959, Fax: 0-4422-4836

This research investigated mechanical property improvements of SiC<sub>p</sub>-reinforced 356 aluminium composite prepared by a cost-effective stir casting process. Four approaches were used to improve mechanical properties of the composite; i) grain refinement by adding Ti-B-Al, ii) modification by adding Sr, iii) Wettability improvement between Al and SiC<sub>p</sub> by adding 1 wt.% Mg and surface treatment of SiC<sub>p</sub> at 1000 °C/4 h, and iv) T6 heat treatment after casting.

The aluminium was melted at 680-700 °C then stir-mixed with SiC<sub>p</sub> with the average size of 10.5 microns at 615 °C for 5 minutes using 0%, 10%, and 15% by weight addition. Stir-mixing was continued for 10 minutes during which the temperature rose up to 650 °C prior to casting into cylindrical permanent moulds. The prepared samples were examined and analysed using a digital optical microscope coupled with image analysis software. Brinell hardness test was carried out to investigate mechanical property of the prepared samples. Experimental results and analyses provide better understanding of the effects of four selected approaches on mechanical property improvement of the composite, and help to extend the engineering applications of SiC<sub>p</sub>-reinforced aluminium composite.

**ผลกระทบจากการเติม Al-5Ti-B Sr และ Mg ต่อโครงสร้างทางจุลภาค  
และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์**  
**Effects of Al-5Ti-B, Sr and Mg Additions  
on Microstructure and Properties of SiC<sub>p</sub>-Reinforced Aluminium Composite**

รุ่งอรุณ บุญตัน<sup>1</sup> ฐานันท์ อุดมผล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ (MEng)

<sup>2</sup>คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

E-mail: roongarun@gmail.com

**บทคัดย่อ**

การผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC<sub>p</sub>) ให้มีการกระจายตัวในโลหะพื้นและมีสมบัติเชิงกลที่ดีตลอดทั้งชิ้นงานนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่น และข้อจำกัดของความสามารถในการเปียก ทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ถูกผสมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ยากและส่งผลให้เกิดปัญหาการแยกตัวและการยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิว การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสม ได้แก่ Al-5Ti-B Sr และ Mg ต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของชิ้นงานด้วยการลดขนาดเกรน ปรับปรุงรูปทรงสถานะของซิลิคอนยูเทคติกและการเพิ่มความสามารถในการเปียกตามลำดับ โดยทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการกวนผสมด้วยอุปกรณ์อย่างง่ายราคาประหยัด เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สมบัติความหนาแน่นและความแข็ง จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพพบว่า การเติม Al-5Ti-B และ/หรือ Sr เพียงอย่างเดียวจะไม่เพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้ดีเท่าที่ควร การเติม Mg ร่วมกับ Al-5Ti-B และ Sr จะส่งผลให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมและมีการกระจายตัวได้มากขึ้นในโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งเป็นผลดีต่อสมบัติความแข็งของชิ้นงานหล่อ

**คำสำคัญ:** วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะ อะลูมิเนียม ซิลิคอนคาร์ไบด์ การขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม แมกนีเซียม สตรอนเทียม สารลดขนาดเกรน

**ABSTRACT**

properties assessments in terms of density and Brinell hardness. Experimental results and phase analysis showed that additions of Al-5Ti-B or Sr alone did not offer good silicon carbide incorporation in the aluminium melt. Additions of Mg along with Al-5Ti-B and Sr improved silicon carbide incorporation, which resulted in good silicon carbide distribution and enhanced density and hardness properties of the composite.

**Keyword:** Metal Matrix Composite, Aluminium, Silicon Carbide, Stir Casting Process, Magnesium, Strontium, Grain refiner

### 1. บทนำ

โลหะผสมอะลูมิเนียมมีบทบาทสำคัญต่อการใช้งานทางวิศวกรรมมากขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบา เพื่อให้การใช้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นในหลายปีที่ผ่านมาจึงมีการศึกษา วิจัย และพัฒนาสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่อง เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานของอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา และมีความเหนียวสูง แต่อย่างไรก็ดี สมบัติความแข็งและความแข็งแรง ก็ยังเป็นปัญหาและข้อจำกัดในการขยายขอบเขตการใช้งานของอะลูมิเนียม ในปัจจุบันมีการปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมในรูปแบบของ "วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)" โดยการนำวัสดุตั้งแต่สองชนิดมาผสมกัน ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะเป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะอยู่ตัวกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสเสริมแรง (Reinforcement) สำหรับวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จัดเป็นวัสดุชนิดใหม่ ในกลุ่มของ "วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะ" (Metal-Matrix Composite; MMCs) ซึ่งเป็นวิธีการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นโลหะที่มีความเหนียวสูงแต่มีความแข็งแรงไม่มากนัก ด้วยการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

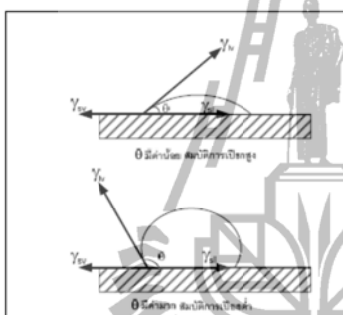
สมบัติของวัสดุเชิงประกอบนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติและปริมาณของวัสดุที่นำมาผสมกัน รวมทั้งรูปทรงทางเรขาคณิตและลักษณะการกระจายตัวของเฟสที่เสริมแรง มีการรายงานการวิจัยวิจัยที่ผ่านมาที่แสดงถึงผลกระทบ

ของ รูปร่าง การกระจายตัวและปริมาณสัมพัทธ์ของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC<sub>2</sub>) ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ นอกจากนี้โครงสร้างทางจุลภาค เช่น ขนาดของเกรนและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะล้วนมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ [1]

ปัญหาสำคัญต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์นั้น คือการทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนโลหะพื้นอะลูมิเนียมนั้น เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน (Al = 2.7 กรัม/ลบ.ซม SiC<sub>2</sub> = 3.22 กรัม/ลบ.ซม) และมีความสามารถในการเปียกผิวต่ำ (Low wettability) จึงทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมกับอะลูมิเนียมได้ยาก ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อมักจะใช้ใบพัดในการกวนผสมในขณะที่น่าโลหะหลอมเหลว ก่อนเทลงในแบบหล่อ จะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีในโลหะพื้น แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคก็ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของใบพัด ความเร็วและเวลาที่ใช้ในการกวนผสม [2] นอกจากนี้ข้อจำกัดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่ต้องพิจารณา คือความสามารถในการเปียก ซึ่งนิยามได้ว่า "ความสามารถของของเหลวที่สามารถแพร่กระจายไปบนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งบ่งบอกได้ถึงขอบเขตของการสัมผัสของพื้นที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว" [3] ดังรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่า สมบัติในการเปียกถูกกำหนดด้วยมุมระหว่างค่า

พลังงานพื้นผิวของอนุภาคและของเหลว (contact angles;  $\theta$ ) ดังนี้

- $\theta = 0$  ของเหลวจะสามารถเปียกกับของแข็งได้อย่างสมบูรณ์
- $\theta = 180$  ของเหลวไม่สามารถเปียกกับของแข็งได้
- $0 < \theta < 180$  ของเหลวสามารถเปียกกับของแข็งได้บางส่วน



รูปที่ 1 แสดงการระบุค่ามุมสัมผัส ( $\theta$ ) ของพลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว [3]

จากรูปที่ 1 พิจารณาแรงที่เกี่ยวข้องกับเทอมของค่า  $\theta$  ทั้ง 3 สามแรงได้แก่ พลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว ( $\gamma_{sl}$ ) พลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและอากาศ ( $\gamma_{sv}$ ) และพลังงานพื้นผิวระหว่างของเหลวและอากาศ ( $\gamma_{lv}$ ) ซึ่งสามารถจัดให้อยู่รูปสมดุลสมการของแรงในสมการที่ (1) ส่วนผลเฉลยของค่า  $\theta$  ในสมการที่ 2 แสดงให้เห็นว่า สมบัติในการเปียกจะเพิ่มขึ้นเมื่อ  $\gamma_{sl}$  มีค่าน้อยกว่า  $\gamma_{sv}$  มากขึ้น ซึ่งจะทำให้เทอมของ  $\theta$  มีค่าเข้าใกล้ 0

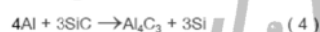
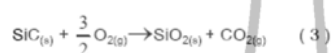
$$\gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta = \gamma_{sv} \quad (1)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \right] \quad (2)$$

การลดแรงตึงผิวของของเหลว จึงเป็นวิธีที่ใช้เพิ่มสมบัติในการเปียกสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมด้วยการเติมธาตุผสม ซึ่งเป็นวิธีการลดแรงตึงผิวด้วยปฏิกิริยาเคมี ได้มีการทดลองยืนยันว่า การใช้แมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสม ให้ผลในการลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้ดีกว่าการใช้ซีเรียม แลนเธนัม บีสมีส เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม สังกะสี และทองแดง เป็นธาตุผสม เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นธาตุที่มีค่าแรงตึงผิวน้อย ( $0.599 \text{ Nm}^{-1}$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม ( $0.760 \text{ Nm}^{-1}$ ) หรือโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน 11.8% ( $0.817 \text{ Nm}^{-1}$ ) เมื่อเติม Mg 3% โดยน้ำหนัก สามารถลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจาก  $0.760 \text{ Nm}^{-1}$  ลงมาที่  $0.620 \text{ Nm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ  $720^\circ \text{C}$  และยังพบว่า ถ้าเติม Mg 1% โดยน้ำหนัก ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดพลังงานพื้นผิวจาก  $860 \text{ dynNm}^{-1}$  เหลือ  $650 \text{ dynNm}^{-1}$  แมกนีเซียมจึงเป็นธาตุผสมที่มีความจำเป็นอย่างมากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการทวนผสม พบว่าปริมาณแมกนีเซียม 1% โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการเพิ่มคุณสมบัติการเปียกระหว่างอะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยปริมาณดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อลักษณะการกระจายตัวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์บนเฟสพื้นอะลูมิเนียมและเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ [4] นอกจากนั้นการเติม Mg ยังเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของชั้นสารประกอบซิลิคอนออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [5]

นอกจากการใช้ Mg เพื่อลดแรงตึงผิวแล้วการเพิ่มสมบัติการเปียกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และน้ำโลหะอะลูมิเนียมยังทำได้ด้วยการให้ความร้อนแก่ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ เพื่อให้เกิดชั้นสารประกอบซิลิคอนออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 3[6] โดยชั้นสารประกอบซิลิคอนออกไซด์ที่เกิดขึ้น นอกจากจะเพิ่มสมบัติในการเปียกแล้วยังเคลือบอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์อย่างต่อเนื่องเป็นแนวป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ [5-8] ป้องกันการเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ ( $\text{Al}_4\text{C}_3$ ) แสดงในสมการที่ (4) [6] ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเปราะสูง

และไม่มีความเสถียรมีความไวกับการเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดการผุกร่อนได้ง่าย [5] ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลเสียต่อความเหนียว (Ductile) และความแกร่ง (Toughness) การให้ความร้อนแก่ผงซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นยังเป็นการจำกัดสิ่งปนเปื้อนและก๊าซบริเวณผิวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ [4]



การที่โลหะมีขนาดเกรนที่เล็กจะถือเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกล การหล่ออะลูมิเนียมด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mould) จะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดี ทำให้อะลูมิเนียมมีขนาดเกรนเล็กกว่าการหล่อด้วยแบบหล่อทราย (Sand Mould) การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมชนิดไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic Aluminum Alloy) ก่อนเทลงแบบหล่อที่นิยมใช้มีสองวิธีคือ การลดขนาดเกรน (Grain Refinement) โดยการเติม Al-5Ti-1B หรือ Al-3Ti-1B และการปรับปรุงรูปทรงสัณฐานของยูเทคติกซิลิคอนให้มีลักษณะใยงมน (Fibrous Structure) และมีขนาดเล็ก ด้วยการเติมสตรอนเทียม (Sr) ประมาณ 0.058% โดยน้ำหนัก หรือเรียกว่าการทำโมดิฟิเคชัน (Modification) การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลดีต่อสมบัติความเหนียวของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม [9]

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเติมธาตุผสม คือ 1) Al-5Ti-1B เพื่อลดขนาดเกรน 2) Sr เพื่อทำโมดิฟิเคชัน และ 3) Mg เพื่อเพิ่มความสามารถในการเปื่อย ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์บนโลหะพื้นอะลูมิเนียมและสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งของชิ้นงานหล่อ ภายใต้สมมุติฐานว่า การกระจายตัวที่ดีของซิลิคอนคาร์ไบด์จะส่งผลให้ค่าความแข็งตามตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานจะมีความแตกต่างกันน้อย โดยคาดหวังว่าการวิจัยจะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการทวนผสมให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

## 2. วิธีการทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้ ใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 356 มีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 การหลอมอะลูมิเนียมใช้เตาไฟฟ้าที่ให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทาน และใช้ใบพัดในการทวนผสมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 สำหรับซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เสริมแรงมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.4  $\mu\text{m}$ . การเตรียมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนนำไปผสมกับอะลูมิเนียม ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ทำการหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 700 °C เติม Al-5Ti-1B 1% Sr 0.06 % และ Mg 1 % โดยน้ำหนักลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม (การเติมธาตุผสมมีความแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลอง แสดงในตารางที่ 2) หลังจากนั้นลดอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมมาที่ 615 °C จากนั้นเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 10% โดยน้ำหนักลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 615 °C ทวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที เพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ 650 °C พร้อมกับการทวนผสมอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 10 นาที ก่อนเทลงแบบหล่อถาวร

การทดสอบสมบัติของชิ้นงานหล่อ กระทำโดยตัดชิ้นงานความยาว 16 ซม. แสดงในรูปที่ 3 แล้วแบ่งเป็นชิ้นขนาดเล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน โดยส่วนที่ 1A 3A และ 5A จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ในส่วนที่ 1 2 3 4 และ 5 จะถูกนำมาตรวจสอบความหนาแน่นด้วยวิธีแทนที่น้ำ (Archimedes's method) ก่อนทำการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness) ชิ้นงานละ 3 ตำแหน่ง

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม 356

Si	Cu	Fe	Zn	Ni	Mg	Cr	Mn	Pb
6.93	0.24	0.03	0.01	0.11	0.41	0.03	0.01	0.06



**3.ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ผ่านการลดขนาดเกรนให้เล็กลงโดยด้วยการเติม Al-5Ti-B 1%โดยน้ำหนักและการทำโมดิฟิเคชันด้วยการเติม Sr 0.06% โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4 ในภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นลักษณะของเกรนที่ไม่เป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Non-Dendrite Structure) แต่มีลักษณะค่อนข้างกลม (Globular Structure) รวมถึงโครงสร้างของยูเทคติกซิลิคอนที่มีลักษณะโค้งมนและมีขนาดเล็ก

ตารางที่ 2 แสดงสัญลักษณ์ของเงื่อนไขการทดลอง

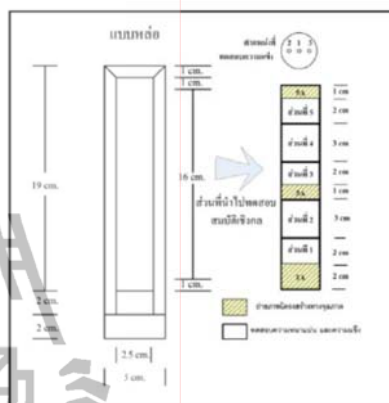
No	Additions				Mechanical Properties	
	Mg	Al-5Ti-B	Sr	% SiC <sub>p</sub>	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (BHN)
1	X	✓	✓	0	2.586	60.50
2	X	✓	X	10	2.518	61.65
3	X	X	✓	10	2.518	61.53
4	X	✓	✓	10	2.508	60.41
5	✓	✓	✓	10	2.559	68.66



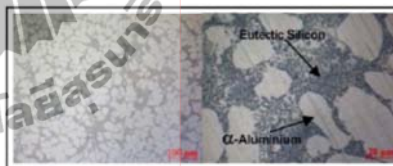
รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โลหะพื้นอะลูมิเนียม (Aluminium Matrix) ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC<sub>p</sub>) และรูพรุน (Porosity) ดังใน

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์บนภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค รวมถึงลักษณะกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC<sub>p</sub>- Cluster) ซึ่งมักอยู่ร่วมกับรูพรุนล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติกที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน



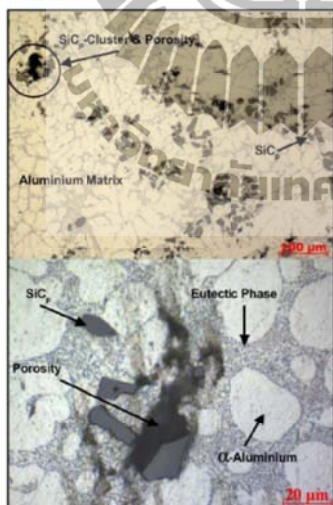
รูปที่ 3 แสดงส่วนของชิ้นงานหล่อหน้าไปทดสอบสมบัติเชิงกล



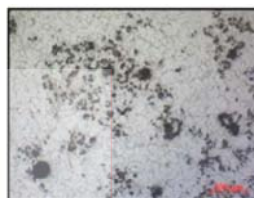
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่เติม 1% Al-5Ti-B และ 0.06% Sr

สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg แสดงโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 6-8 ซึ่งพบลักษณะของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (SiC<sub>p</sub>- Cluster) และมักอยู่ร่วมกับรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากกระจายอยู่ในโครงสร้างทางจุลภาค ลักษณะดังกล่าวจะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ส่วนผลกระทบจากการเติม Mg ต่อลักษณะการกระจายตัวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาคแสดงในรูปที่ 9 จะพบว่าผงซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวได้ดีขึ้นในโลหะ

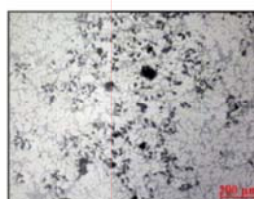
พื้นอะลูมิเนียม และพบ  $\text{SiC}_p$ -Cluster ที่มีขนาดเล็ก และจำนวนน้อยกระจายอยู่บ้างในโครงสร้างทางจุลภาค การวิเคราะห์ส่วนประกอบในวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ภายใต้สมมุติฐานว่า ร้อยละของสัดส่วนพื้นที่เท่ากับร้อยละโดยปริมาตร (% Area Fraction = Volume Percent) เพื่อหาร้อยละของพื้นที่ เฟสพื้น เฟสเสริมแรง และรูพรุนที่ปรากฏอยู่บนโครงสร้างทางจุลภาค โดยผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงในรูป 10 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg 1% โดยน้ำหนัก จะพบปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคในปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงไปคือ 10% จากผลการวิเคราะห์ภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อพบปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาคมากขึ้นก็มีแนวโน้มที่จะพบรูพรุนมากขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg เพื่อเพิ่มสมบัติในการเปียกนั้น ลักษณะของรูพรุนที่ปรากฏบนโครงสร้างทางจุลภาคจะมีขนาดเล็กกว่า



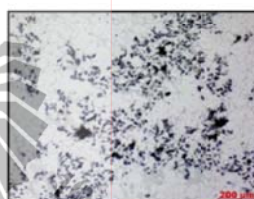
รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบบนโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์



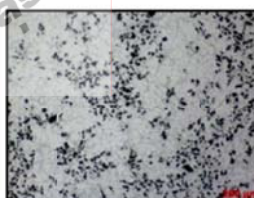
รูปที่ 6 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Al-5Ti-B



รูปที่ 7 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Sr



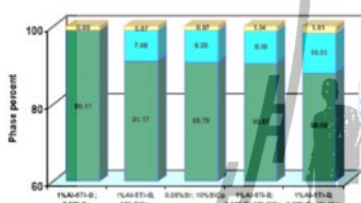
รูปที่ 8 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Al-5Ti-B และ Sr



รูปที่ 9 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Al-5Ti-B, Sr และ Mg

ผลการทดสอบความหนาแน่นด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Archimedes's Method) ในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มสมบัติในการเปียกด้วยการเติม Mg มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด คือ ความหนาแน่นเฉลี่ย  $2.56 \text{ g/cm}^3$  แต่อย่างไรก็ดีเมื่อมีซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นส่วนผสม ทำให้มีรูพรุนเป็น

ส่วนประกอบเพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ ส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 10% ทุกเงื่อนไขในการทดลองนี้ มีความหนาแน่นน้อยกว่าอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีความหนาแน่นเฉลี่ย 2.59 g/cm<sup>3</sup>

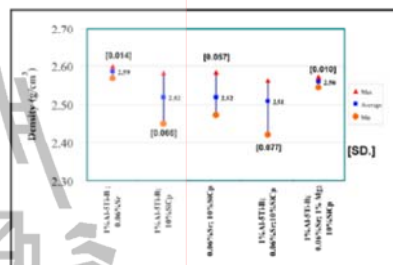


รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ภาพตัดขวางทางจุลภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg มีความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมากระหว่างแต่ละชิ้นงานทดสอบ ซึ่งทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) มีค่าสูง ส่วนตัวอย่างที่เติม Mg พบว่าความหนาแน่นของแต่ละชิ้นงานทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยคือ 0.010 ผลการทดสอบความหนาแน่นที่ให้ค่า S.D. สูงนี้บ่งบอกได้ว่า การหล่อวัสดุเชิงประกอบในแต่ละครั้ง น่าจะมีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์และรูพรุนในโลหะพินอะลูมิเนียมที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากการไม่เติม Mg วัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน น่าจะสันนิษฐานได้ว่าการเติม Mg 1% โดยน้ำหนัก ลงในวัสดุเชิงประกอบเพื่อเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างโลหะอะลูมิเนียมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยการลดแรงดึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [4] ย่อมทำให้การควบคุมส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบทำได้ง่ายขึ้น

ผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนล ณ ตำแหน่งต่างๆ แสดงในรูปที่ 12 พบว่าแนวโน้มค่าความแข็งเฉลี่ยจะมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ โดยวัสดุเชิงประกอบที่เพิ่ม

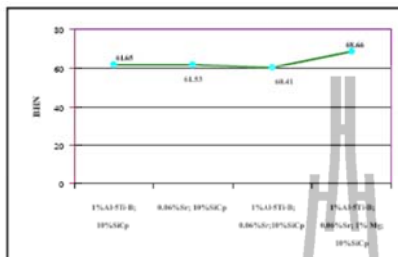
ความสามารถการเปียกด้วยการเติม Mg จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด คือ 68.66 BHN ซึ่งผลจากการเติม Mg ทำให้จะพบลักษณะการกระจายตัวที่ดีของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาค ลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อความสม่ำเสมอของชิ้นงานหล่อ เป็นผลให้ผลค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg เป็นชุดผสมมีความแตกต่างตามตำแหน่งน้อย (S.D. ต่ำ) เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg ทั้งสามเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 13



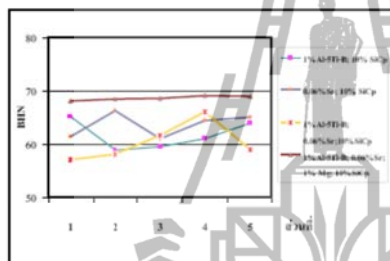
รูปที่ 11 แสดงผลการหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Archimede's Method)

4. สรุปผลการทดลอง

- การเติม Sr, Al-5Ti-1B โดยไม่เติม Mg ทำให้เกิด SiC<sub>p</sub>-Cluster ที่มีขนาดใหญ่และรูพรุนจำนวนมาก กระจายอยู่บนโครงสร้างทางจุลภาค เป็นผลเสียต่อสมบัติความหนาแน่นและความแข็งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ
- การเติม Mg ช่วยเพิ่มสมบัติการเปียก (Wettability) ทำให้มีผงซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถผสมลงในโลหะพินอะลูมิเนียมได้มากขึ้น และพบลักษณะการกระจายตัวที่ดีของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะของ SiC<sub>p</sub>-Cluster ที่พบมีจำนวนน้อยและมีขนาดเล็ก
- การกระจายตัวที่ดีของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากเติม Mg ทำให้ค่าความหนาแน่นและความแข็งมี S.D. ต่ำ หรือมีโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอมากกว่าไม่เติม Mg



รูปที่ 12 แสดงค่าความแข็งแรงเฉื่อยของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 13 แสดงค่าความแข็ง ตามตำแหน่ง  
ของวัสดุเชิงประกอบ

3. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนงบประมาณจากเงินอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

4. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Abedi, M. Emamy. "The effect of Fe, Mn and Sr on the microstructure and tensile properties of A356-10% SiC composite", *Materials Science and Engineering A* 527, pp. 3733-3740, 2010.

[2] S. Balasivanandha Prabu, L. Karunamoorthy, S. Kathiresan, B. Mohanb. "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology* 171, pp.268-273, 2006.

[3] Chawla, K.K.. (2003). *Ceramic matrix composites*. 2<sup>nd</sup>ed. Boston. Kluwer Academic Publishers.

[4] J. Hashim, L. Looney, M.S.J. Hashmi. "The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology* 119. pp.329-335, 2001.

[5] Jae-Chul Lee, Jae-Pyoung Ahn, Jae-Hyeok Shim1, Zhongliang Shi1, Ho-In Lee, "Control of The Interface in SiC/Al Composite", *Scripta Materialia* 41, pp.895-900, 1999.

[6] M. Villegas, T. Sierra, F. Lucas, J.F. Fernandez, A.C. Caballero. "Oxidation treatments for SiC particles and its compatibility with glass", *Journal of the European Ceramic Society* 27, pp.861-865, 2007.

[7] A. Urena, E.E. Martinez, P. Rodrigo, L. Gil, "Oxidation treatments for SiC particles used as reinforcement in aluminium matrix composites". *Composites Science and Technology* 64, pp.1843-1854, 2004.

[8] J. Hashim, L. Looney, M.S.J. Hashmi. "Metal matrix composites: production by the stir casting method", *Journal of Materials Processing Technology* 92-93, pp.1-7, 1999.

[9] ชาวลิต สัมมนวีจิตร. โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม - ซีลิกอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ. หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางหล่อโลหะ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวรุ่งอรุณ บุญถ่านเกิดเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พุทธศักราช 2517 สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมจากโรงเรียนมัธยมด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2536 และสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2541 หลังจากนั้นได้มีประสบการณ์ใน การทำงาน เริ่มจากปีพุทธศักราช 2541-2543 ทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิเคราะห์นโยบายและ แผน ที่ศูนย์วิชาการจัดระบบการจราจรและการขนส่งเมืองภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนล่าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีพุทธศักราช 2544-2545 ทำงานใน ตำแหน่งวิศวกรการจราจรและจัดระบบฐานข้อมูล ที่ศูนย์วิชาการจัดระบบการจราจรและการขนส่ง เมืองภูมิภาค ภาคเหนือแห่งที่ 2 มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ในปีพุทธศักราช 2548 ทำงานในตำแหน่งผู้ประเมินภายนอก (สำนักงานรับรองมาตรฐานและประเมินคุณภาพการศึกษา (องค์การมหาชน)) ที่ห้างหุ้นส่วนจำกัดตะวันออกประเมินมาตรฐานการศึกษา จังหวัดชลบุรี และ ในปีพุทธศักราช 2548-2554 ผู้ช่วยวิจัยประจำหน่วยวิจัยด้านวิศวกรรมโยธา สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ทั้งนี้ได้เข้าศึกษาในระดับ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2551 และ ได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก จากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ยังมี ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ ดังนี้

1. Roongarun Buntan, Daraporn Phuenchomphu, Peeradecc Sukmoung, Kanjana Doomao, Oat Auunnapiwat and Tapanu Udompol, Mechanical Properties of Stri-Mixed SiCp-Reinforced Aluminium Composite. การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4. 17-19 พฤศจิกายน 2553. เขาใหญ่ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

2. Roongarun Buntan, Tapanu Udomphol. Microstructure–Property Relation of Stir-Mixed SiC<sub>p</sub>-Reinforced Aluminium Composites. การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5. 19-20 มกราคม 2555. กรุงเทพมหานคร

3. รุ่งอรุณ บุญถ่าน และฐาปนีย์ อุดมผล. (2554). ผลกระทบจากการเติม Al-5Ti-B Sr และ Mg ต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพื่นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอน คาร์ไบด์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.ปีที่ 6 ฉบับที่ 1. 31-38