

การผลิตโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม – ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีโพรงอากาศแบบเปิด
โดยการแทรกซึมด้วยความดัน

นายเอกภักดิ์ วิเชียรรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PRODUCTION OF OPEN – CELL ALUMINIUM – SILICON CARBIDE COMPOSITE
FOAMS BY PRESSURE INFILTRATION

Mr. Ekkapak Wichianrat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

เอกภักดิ์ วิเชียรรัตน์ : การผลิตโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีโพรงอากาศแบบเปิดโดยการแทรกซึมด้วยความดัน. (PRODUCTION OF OPEN - CELL ALUMINIUM - SILICON CARBIDE COMPOSITE FOAMS BY PRESSURE INFILTRATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, 79 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีหล่อแบบพอกหุ่น ผลของปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และขนาดโพรงอากาศต่อโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม กระบวนการผลิตจะใช้โฟมโพลียูรีเทนที่มีขนาดโพรงอากาศ 8 12 และ 20 ppi เป็นต้นแบบเพื่อผลิตโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์โดยมีเนื้อพื้นเมตริกซ์เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A โดยแปรผันปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 1200°C ความดันสุญญากาศที่ 1 bar และความดันอัดที่ 1.2 bar การทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมใช้ชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 cm และใช้ความเร็วหัวกด 1 mm/min

ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการนี้สามารถผลิตโฟมวัสดุผสม AC3A - ซิลิคอนคาร์ไบด์ ได้ทุกขนาดโพรงอากาศแต่สำหรับเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่สามารถผลิตโฟมที่มีขนาดโพรงอากาศ 12 และ 20 ppi ได้ ซึ่งโฟมที่ผลิตได้มีโครงสร้างโดยรวมที่ดี มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีทั้งบนผิวและในเนื้อก้านโพรงอากาศ สามารถพบอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เริ่มรวมกลุ่มกันได้ที่ปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ 4 และ 5 wt.% การเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ส่งผลต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นและส่งผลต่อสมบัติทางกลเช่น ความแข็งแรงจุดคราก ความเค้นพลาโต การดูดซับพลังงาน และความแข็งสูงขึ้น โฟมวัสดุผสม AC3A - ซิลิคอนคาร์ไบด์ มีสมบัติทางกลโดยรวมสูงกว่าโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ - ซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งที่ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีสมบัติทางกลสูงที่สุดรองลงมาคือ 20 และ 12 ppi ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา..2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170542821 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ALUMINIUM FOAM / POLYURETHANE FOAM / PRESSURE INFILTRATION CASTING / REPLICATION PROCESS / INVESTMENT CASTING / METAL MATRIX COMPOSITE, MMCs / ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE

EKKAPAK WICHIANRAT : PRODUCTION OF OPEN – CELL ALUMINIUM – SILICON CARBIDE COMPOSITE FOAMS BY PRESSURE INFILTRATION.

ADVISOR : ASST. PROF. SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D.

CO-ADVISOR : YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D., 79 pp.

The objective of this research is to study the production of silicon carbide (SiC) particulated aluminium matrix composite foams by investment casting technique and to investigate the effects of SiC particle content and pore sizes on macrostructure, microstructure and mechanical properties of the foams. Pure Al and AC3A Al alloy, mixed with SiC particles, have been used to produce open-cell composite foams with of 8, 12 and 20 ppi polyurethane foam preforms at 1200°C, assisted with 1.2 bar infiltration pressure. The 20 x 20 x 20 mm of sectioned foams were compressed at the cross-head speed of 1 mm/min.

It is found that this process can produce AC3A composite foams for all pore sizes, but for pure Al, 12 and 20 ppi foams cannot be produced. Both types of foams are well replicated. SiC particles are well dispersed in strut and plateau border of all foams. Clusters of SiC particles in matrix and strut surface are found in 4 and 5 wt.%SiC additions. Increasing SiC addition results in increasing relative density and mechanical properties, such as yield strength, plateau stress, energy absorption and hardness. Mechanical properties of AC3A composite foams are much higher than pure Al composite foams. AC3A composite foams with 12 ppi pores have the best mechanical properties, followed by 20 and 8 ppi pores respectively.

Department : Metallurgical Engineering... Student's Signature

Field of Study : Metallurgical Engineering... Advisor's Signature

Academic Year : 2011..... Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ของหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ สำหรับการสละเวลาให้คำปรึกษาทั้งด้านการเรียน การทำงานและปัญหาชีวิตตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คุณเสนีย์ มณีเพชร ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในเรื่องเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนผู้จัดทำในทุกด้านด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรม โลหการทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือเรื่องเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย คำแนะนำ ความรู้ต่างๆ รวมถึงการสร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุน 90 ปี ที่ช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับวัสดุ อุปกรณ์ และค่าสนับสนุนอื่น ช่วยให้งานวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัทลูน่า จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบ ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเตรียมชิ้นงาน และขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัววิเชียรรัตน์ โดยเฉพาะบิดาและมารดาของข้าพเจ้าผู้ซึ่งทำงานหนักมาทั้งชีวิตเพื่อให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้ ทั้งยังเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำมาโดยตลอด นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลอันเป็นที่รักที่คอยให้กำลังใจในการสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โฟมโลหะ.....	4
2.1.1 โครงสร้างของโฟมโลหะ.....	4
2.1.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ.....	5
2.1.3 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ.....	5
2.1.4 การนำไปใช้งานสำหรับโฟมโลหะ.....	5
2.2 โฟมอะลูมิเนียม.....	6
2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	6
2.3.1 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด.....	7
2.3.1.1 กระบวนการผลิตในสถานะของเหลวโดยการเป่าแก๊สโดยตรง (Direct foaming with gas).....	7
2.3.1.2 กระบวนการผลิตในสถานะของเหลวโดยการสลายตัวของสาร ปล่อยแก๊ส (Direct foaming with foaming agent).....	7
2.3.1.3 กระบวนการผลิตในสถานะของเหลวโดยกรรมวิธีโลหะผง (Powder compact melting).....	8
2.3.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด.....	9

2.3.2.1 กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการถอดแบบโดยใช้แม่พิมพ์ เกลือ (Replication Process).....	9
2.3.2.2 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น (Investment casting).....	10
2.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อจากแบบพอกหุ่นจากโฟม พอลิเมอร์ (Investment casting with polymer foams).....	11
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่น....	12
2.5.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	12
2.5.2 ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม.....	12
2.5.3 เวลาที่ใช้ในการให้ความดัน.....	13
2.5.4 วัสดุที่ใช้ในการผลิตต้นแบบ.....	13
2.5.5 วัสดุที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	14
2.5.6 ความหนืดของน้ำโลหะหลอมเหลว.....	15
2.6 วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (Metal-matrix composites, MMCs).....	15
2.6.1 ลักษณะของ MMCs.....	15
2.6.2 กระบวนการผลิต MMCs.....	16
2.6.2.1 กรรมวิธีการผลิตในสภาพของเหลว (Liquid state processing).....	16
2.7 คุณสมบัติของ MMCs.....	18
2.7.1 สมบัติทางกายภาพ.....	18
2.7.2 สมบัติทางกล.....	19
2.7.2.1 คุณสมบัติอิลาสติก (Elastic properties).....	19
2.7.2.2 ความแข็งแรงและความเหนียวที่อุณหภูมิห้อง.....	20
2.7.2.3 คุณสมบัติที่อุณหภูมิสูง.....	21
2.7.2.4 ความต้านทานความล้า.....	22
2.8 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ.....	22
2.8.1 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด.....	23
2.8.2 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด.....	25
2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของโฟมโลหะ.....	26

2.8.3.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิต.....	27
2.8.3.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	27
2.8.3.3 ชนิดโครงสร้างของโฟมโลหะ.....	28
2.8.3.4 ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ.....	29
2.8.3.5 ตำหนิของโฟมโลหะ (Defects).....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.3.1 การเตรียมแบบเทียนสำหรับการหล่อ.....	32
3.3.2 การเตรียมวัสดุผสมเนื้อฟีนอะลูมิเนียม.....	33
3.3.3 การเตรียมอะลูมิเนียมก่อนการทำการหล่อ.....	33
3.3.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม	34
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม.....	35
3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	35
3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง.....	36
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	36
3.5 การทดสอบสมบัติการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม.....	36
3.5.1 ความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength).....	36
3.5.2 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption, E).....	37
3.6 วิเคราะห์ข้อมูล.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	38
4.1 คุณลักษณะของวัสดุ.....	38
4.1.1 คุณลักษณะของซิลิกอนคาร์ไบด์.....	38
4.1.2 คุณลักษณะของโฟมโพลียูรีเทน.....	39
4.1.3 คุณลักษณะของอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A.....	40
4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม (Macrostructure).....	40

4.3 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม (Microstructure).....	47
4.4 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม (Relative Density of Al Foams)...	52
4.5 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม (Compressive Test).....	52
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	63
5.1 ผลของวัสดุเนื้อพื้น.....	63
5.1.1 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อกระบวนการผลิต.....	63
5.1.2 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค.....	63
5.1.3 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	64
5.1.4 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อสมบัติทางกล.....	64
5.2 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide, Si)	64
5.2.1 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อกระบวนการผลิต.....	64
5.2.2 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างมหภาคและ โครงสร้างจุลภาค.....	66
5.2.3 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	66
5.2.4 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติทางกล.....	67
5.3 ผลของขนาดโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม.....	68
5.3.1 ผลของขนาดโพรงอากาศต่อกระบวนการผลิต.....	68
5.3.2 ผลของขนาดโพรงอากาศต่อโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค....	69
5.3.3 ผลของขนาดโพรงอากาศต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	69
5.3.4 ผลของขนาดโพรงอากาศต่อสมบัติทางกล.....	70
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สารบัญตาราง

ฉ

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ศักยภาพในการออกแบบการนำไปใช้งานของโพลีโลหะ	6
ตารางที่ 2.2 ข้อดีข้อเสียของกระบวนการผลิตโพลีแบบหล่อแบบพอกหุ่น.....	11
ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาอนุकारิปัด.....	38
ตารางที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของโพลีโพลีเอธิลีน.....	39
ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของโพลีโพลีเอธิลีนแต่ละขนาดโพรงอากาศ.....	40
ตารางที่ 4.4 ส่วนผสมของอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A	40
ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงอัด.....	56

สารบัญภาพ

ฎ

หน้า

ภาพที่ 2.1 (ก) โพรงอากาศแบบปิด	
(ข) โพรงอากาศแบบเปิด.....	4
ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตในสภาวะของเหลวโดยการเป่าแก๊สโดยตรง.....	7
ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตในสภาวะของเหลวโดยการสลายตัวของสารละลายแก๊ส.....	8
ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง.....	9
ภาพที่ 2.5 กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการถอดแบบโดยใช้แม่พิมพ์เกลือ.....	10
ภาพที่ 2.6 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น.....	11
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟม ต่อความดันที่ใช้ในการ แทรกซึม.....	12
ภาพที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของอะลูมิเนียมที่ซิลิคอน wt.% ต่างๆกัน (Al-Si phase diagram)...	14
ภาพที่ 2.9 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม.....	15
ภาพที่ 2.10 ลักษณะการเป็ยก.....	17
ภาพที่ 2.11 กรรมวิธีการหล่อแบบปั๊มอัด.....	18
ภาพที่ 2.12 การเปรียบเทียบการขยายตัวทางความร้อนของโลหะและ MMCs	19
ภาพที่ 2.13 ผลของตัวเสริมแรงต่อค่ามอดุลัสของยังของอะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้อพื้น อะลูมิเนียม.....	20
ภาพที่ 2.14 ผลของปริมาณตัวเสริมแรงต่อค่ามอดุลัสของยังของวัสดุผสมอะลูมิเนียมชนิด ต่างๆ.....	20
ภาพที่ 2.15 ผลของปริมาตรของตัวเสริมแรงต่อความแข็งแรงของวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วย เส้นใยต่อเนื่องและผงอนุภาค.....	21
ภาพที่ 2.16 อัตราความคืบของ MMCs	21
ภาพที่ 2.17 กราฟความล้าของโลหะอะลูมิเนียมผสมและวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย อะลูมินา.....	22
ภาพที่ 2.18 กราฟความเค้น - ความเครียด ของโฟมโลหะในอุดมคติ.....	23
ภาพที่ 2.19 กราฟความเค้น - ความเครียด สำหรับการหาค่าความสามารถในการดูดซับ แรงกระแทก.....	23

ภาพที่ 2.20 กราฟความเค้น-ความเครียด ของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดที่ความหนาแน่น 0.16 g/cm ³	24
ภาพที่ 2.21 กราฟความเค้น - ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิดของโฟม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และโฟม Al - 12Si ความหนาแน่น สัมพัทธ์ 0.27	25
ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับมอดุลัสของยังหรือมอดุลัส ยืดหยุ่น ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas	27
ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความเค้นสูงสุด ของโฟมโลหะ แบบ Alcan และ Alporas	28
ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความแข็งแรง ณ จุดคราก ของ โฟมโลหะ	28
ภาพที่ 2.25 เปรียบเทียบแรงอัดอัดระหว่าง โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิด และแบบเปิด...	28
ภาพที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสัมพัทธ์กับ L/d.....	30
ภาพที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากสัมพัทธ์กับ L/d.....	30
ภาพที่ 3.1 ต้นเทียนที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิต	32
ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	35
ภาพที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของผงซิลิกอนคาร์ไบด์.....	38
ภาพที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม	
(a) Pure Al 8 ppi	
(b) Al + 1 wt.%SiC 8 ppi	
(c) Al + 2 wt.%SiC 8 ppi	
(d) Al + 3 wt.%SiC 8 ppi	
(e) Al + 4 wt.%SiC 8 ppi	
(f) Al + 5 wt.%SiC 8 ppi	
(g) AC3A 20 ppi	
(h) AC3A + 1 wt.%SiC 20 ppi	
(i) AC3A + 2 wt.%SiC 20 ppi	
(j) AC3A + 3 wt.%SiC 20 ppi	

(k) AC3A + 4 wt.%SiC 20 ppi	
(l) AC3A + 5 wt.%SiC 20 ppi	
(m) AC3A 12 ppi	
(n) AC3A + 1 wt.%SiC 12 ppi	
(o) AC3A + 2 wt.%SiC 12 ppi	
(p) AC3A + 3 wt.%SiC 12 ppi	
(q) AC3A + 4 wt.%SiC 12 ppi	
(r) AC3A + 5 wt.%SiC 12 ppi	
(s) AC3A 8 ppi	
(t) AC3A + 1 wt.%SiC 8 ppi	
(u) AC3A + 2 wt.%SiC 8 ppi	
(v) AC3A + 3 wt.%SiC 8 ppi	
(w) AC3A + 4 wt.%SiC 8 ppi	
(x) AC3A + 5 wt.%SiC 8 ppi.....	42
ภาพที่ 4.3 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ	
(a) Pure Al 8 ppi	
(b) Al + 1 wt.%SiC 8 ppi	
(c) Al + 2 wt.%SiC 8 ppi	
(d) Al + 3 wt.%SiC 8 ppi	
(e) Al + 4 wt.%SiC 8 ppi	
(f) Al + 5 wt.%SiC 8 ppi.....	43
ภาพที่ 4.4 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ	
(a) AC3A 20 ppi	
(b) AC3A + 1 wt.%SiC 20 ppi	
(c) AC3A + 2 wt.%SiC 20 ppi	
(d) AC3A + 3 wt.%SiC 20 ppi	
(e) AC3A + 4 wt.%SiC 20 ppi	
(f) AC3A + 5 wt.%SiC 20 ppi	44

ภาพที่ 4.5 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ	
(a) AC3A 12 ppi	
(b) AC3A + 1 wt.%SiC 12 ppi	
(c) AC3A + 2 wt.%SiC 12 ppi	
(d) AC3A + 3 wt.%SiC 12 ppi	
(e) AC3A + 4 wt.%SiC 12 ppi	
(f) AC3A + 5 wt.%SiC 12 ppi	45
ภาพที่ 4.6 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ	
(a) AC3A 8 ppi	
(b) AC3A + 1 wt.%SiC 8 ppi	
(c) AC3A + 2 wt.%SiC 8 ppi	
(d) AC3A + 3 wt.%SiC 8 ppi	
(e) AC3A + 4 wt.%SiC 8 ppi	
(f) AC3A + 5 wt.%SiC 8 ppi	46
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ	
(a) Pure Al 8 ppi	
(b) Al + 1 wt.%SiC 8 ppi	
(c) Al + 2 wt.%SiC 8 ppi	
(d) Al + 3 wt.%SiC 8 ppi	
(e) Al + 4 wt.%SiC 8 ppi	
(f) Al + 5 wt.%SiC 8 ppi.....	48
ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ	
(a) AC3A 20 ppi	
(b) AC3A + 1 wt.%SiC 20 ppi	
(c) AC3A + 2 wt.%SiC 20 ppi	
(d) AC3A + 3 wt.%SiC 20 ppi	
(e) AC3A + 4 wt.%SiC 20 ppi	
(f) AC3A + 5 wt.%SiC 20 ppi	49

ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ	
(a) AC3A 12 ppi	
(b) AC3A + 1 wt.%SiC 12 ppi	
(c) AC3A + 2 wt.%SiC 12 ppi	
(d) AC3A + 3 wt.%SiC 12 ppi	
(e) AC3A + 4 wt.%SiC 12 ppi	
(f) AC3A + 5 wt.%SiC 12 ppi	50
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ	
(a) AC3A 8 ppi	
(b) AC3A + 1 wt.%SiC 8 ppi	
(c) AC3A + 2 wt.%SiC 8 ppi	
(d) AC3A + 3 wt.%SiC 8 ppi	
(e) AC3A + 4 wt.%SiC 8 ppi	
(f) AC3A + 5 wt.%SiC 8 ppi	51
ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานไฟมอะลูมิเนียม.....	52
ภาพที่ 4.12 ลักษณะการทดสอบแรงอัดของไฟมอะลูมิเนียมที่ความเครียด 0% 30% และ	
70% ของไฟม AC3A 12 ppi.....	54
ภาพที่ 4.13 กราฟความเค้นความเครียดของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาด	
8 ppi.....	54
ภาพที่ 4.14 กราฟความเค้นความเครียดของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 8 ppi.....	55
ภาพที่ 4.15 กราฟความเค้นความเครียดของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 12 ppi.....	55
ภาพที่ 4.16 กราฟความเค้นความเครียดของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 20 ppi.....	56
ภาพที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงจุดครากของไฟมอะลูมิเนียม.....	60
ภาพที่ 4.18 ค่าความเค้นในช่วงพลาโตของไฟมอะลูมิเนียม.....	60
ภาพที่ 4.19 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของไฟมอะลูมิเนียม.....	61
ภาพที่ 4.20 ค่าความแข็งของไฟมอะลูมิเนียม.....	61
ภาพที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงจุดครากจำเพาะของไฟมอะลูมิเนียม.....	62
ภาพที่ 4.22 ค่าความเค้นพลาโตจำเพาะของไฟมอะลูมิเนียม.....	62

ภาพที่ 5.1 แบบจำลองการรับแรงของอนุภาคซิลิกาอนุคาร์ไบต์ในเนื้ออะลูมิเนียม

(ก) อะลูมิเนียมผสมอนุภาคซิลิกาอนุคาร์ไบต์ 17.9 vol. %

(ข) อะลูมิเนียมผสมอนุภาคซิลิกาอนุคาร์ไบต์ 35.2 vol. %..... 68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โพลีโพลีเมอร์มีสมบัติเฉพาะหลายอย่างที่เป็นจุดเด่นรวมกัน ซึ่งไม่สามารถหาได้จากวัสดุอื่น เช่น มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีสมบัติการถ่ายเทความร้อนที่ดี และมีสมบัติการดูดซับพลังงานจากการอัดกระแทกที่ดี สำหรับโพลีโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเปิดมักนิยมนำไปใช้ในงานเฉพาะด้าน เช่น ใช้ในการคัดกรองอนุภาค ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและตัวเก็บประจุ เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ความสามารถที่ของไหลสามารถไหลผ่านได้ การมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรในการแลกเปลี่ยนความร้อนและในการเก็บประจุที่สูง

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดบนผิวดิน จึงหาวัตถุดิบมาผลิตเป็นโลหะอะลูมิเนียมได้ง่าย และราคาถูก ด้วยคุณสมบัติที่ดีของอะลูมิเนียมไม่ว่าจะเป็น ความแข็งแรงที่เพียงพอต่อการใช้งานส่วนใหญ่ ความเหนียวที่สูง มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆที่ใช้กันโดยทั่วไป มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก (รีไซเคิล) และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำอะลูมิเนียมมาใช้ในงานต่างๆมากมาย ไม่เว้นแม้กระทั่งในกระบวนการผลิตโพลีโพลีเมอร์

การเติมอนุภาคเซรามิกลงไปในอะลูมิเนียมมีจุดประสงค์เพื่อต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมที่มีการเติมอนุภาคเซรามิก จะเรียกว่าวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (Al-matrix composites) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น

โพลีโพลีเมอร์สามารถผลิตได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นกรรมวิธีผลิตแบบโลหะผง การหล่อโดยการเป่า แก๊สโดยตรงและอื่นๆ ซึ่งวิธีการผลิตดังกล่าวมีข้อเสียที่ผลิตโพลีโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบปิดที่มีความสม่ำเสมอของขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศควบคุมได้ยาก แต่ในการผลิตโพลีโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเปิดจะนิยมผลิตด้วยกรรมวิธีการถอดแบบซึ่งจะทำให้ได้โพลีโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการกับต้นแบบที่ใช้ หนึ่งในวิธีการผลิตโพลีโพลีเมอร์จากต้นแบบที่นิยมคือการหล่อแบบพอกหุ่น (Investment casting) ในกระบวนการนี้จะใช้โพลีโพลีเมอร์เป็นต้นแบบในกระบวนการผลิต วัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมในขณะหลอมเหลวจะมีความหนืดสูงมาก การแทรกตัวเข้าไปในแบบของแม่พิมพ์ ซึ่งมีขนาดเล็กมากจะทำได้ยาก จึงต้องมีการใช้ความดันในสภาวะสุญญากาศ เพื่อช่วยให้น้ำโพลีโพลีเมอร์สามารถแทรกซึมเข้าไปในแม่พิมพ์ได้เต็มแบบ

การทำวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะทำการพัฒนาโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด โดยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้แรงดัน และเพื่อศึกษาโครงสร้างของโฟมและสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้อง อันเป็นผลมาจากการผสมอนุภาคเซรามิกในโฟม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้แรงดัน (Pressure infiltration casting)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดโพรงอากาศต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 การศึกษาการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้โฟมโพลียูรีเทนที่มีขนาดโพรงอากาศ 812 20 ppi เป็นตัวต้นแบบในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม
- 1.3.2 มีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่อัตราส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ 1 2 3 4 และ 5 wt.%

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

โฟมอะลูมิเนียม (Aluminium foam), โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane foams), กรรมวิธีการหล่อแทรกซึมโดยใช้แรงดัน (Pressure infiltration casting), สมบัติทางกล (Mechanical properties), วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (Metal-matrix composites, MMCs), วัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (Aluminium- matrix composites)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีการหล่อแทรกซึมโดยใช้แรงดัน
- 1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างมหภาคและจุลภาคต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม
- 1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้อโฟมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนคาร์ไบด์
- 1.5.4 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปริมาณ รูปร่าง การเกาะติดและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

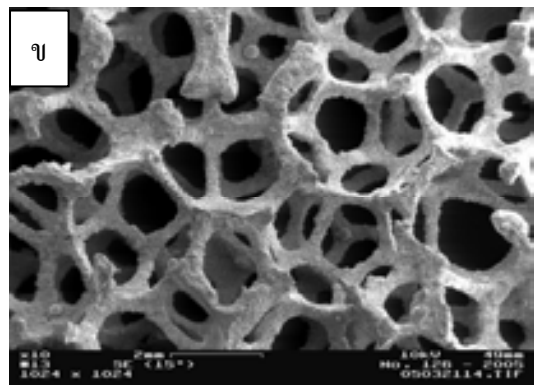
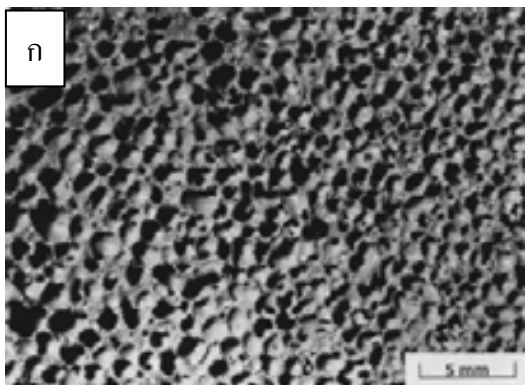
2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายของโพรงอากาศ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วยเนื้อโลหะและโพรงอากาศ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ ในปริมาณที่เท่ากัน โฟมโลหะจะมีน้ำหนักเบามากเป็นพิเศษ โดยส่วนใหญ่โฟมโลหะจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า 1 g/cm^3 ซึ่งน้อยกว่าความหนาแน่นของน้ำ นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีคุณสมบัติดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้ดี

โฟมโลหะโดยทั่วไป ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อโลหะ และส่วนที่เป็นโพรงอากาศ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโฟมโลหะเป็นดังนี้

2.1.1 โครงสร้างของโฟมโลหะ

สามารถจำแนกตามโครงสร้างโพรงอากาศของโฟม (Cell) ได้ 2 ประเภทคือ โพรงอากาศแบบปิด (Closed-cell) และโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด (Open-cell) โดยที่โครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด มีลักษณะโครงข่ายเนื้อโลหะปิดรอบโพรงอากาศ ซึ่งแต่ละโพรงอากาศจะไม่เชื่อมต่อกัน ของไหลไม่สามารถไหลผ่านได้ ความแข็งแรงของแต่ละโพรงอากาศมีค่าสูง ส่วนโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด แต่ละโพรงอากาศจะเชื่อมต่อกัน ของไหลสามารถไหลผ่านจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งได้



ภาพที่ 2.1 (ก) โพรงอากาศแบบปิด และ (ข) โพรงอากาศแบบเปิด [1 - 2]

2.1.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของโฟมโลหะ (ρ^*) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของโฟมโลหะต่อความหนาแน่นของเนื้อโลหะที่ใช้ทำโฟม โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถแสดงได้ในสมการ (2.1)

$$\% \rho^* = \frac{\rho_f}{\rho_s} \times 100\% \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะและ ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งเมื่อค่า ρ^* เพิ่มขึ้น ความหนาของเส้นโครงข่ายก็จะหนาขึ้นและปริมาตรโพรงอากาศโดยรวมจะลดลง โดยทั่วไปโฟมโลหะจะมีค่า ρ^* น้อยกว่า 30%

จากสมการ (2.1) สามารถคำนวณเป็นปริมาณของโพรงอากาศได้ดังสมการ (2.2)

$$\% P = 100\% - \% \rho^* \quad (2.2)$$

2.1.3 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ

ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศของโฟมโลหะ มีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับสมบัติทางกลของโฟมโลหะ วิธีการผลิตที่แตกต่างกันส่งผลให้ได้โพรงอากาศที่ต่างกัน ซึ่งขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศที่ต่างกัน ส่งผลให้ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) และความแข็งแรง (Strength) ของโฟมมีค่าแตกต่างกันไป

2.1.4 การนำไปใช้งานสำหรับโฟมโลหะ

โฟมโลหะนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมเป็นหลัก สามารถนำไปใช้งานในด้านโครงสร้าง การรับแรงสั่นสะเทือน การดูดซับเสียงและพลังงาน หนวนวนกันความร้อน ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวกรอง เป็นต้น [3] ศักยภาพในการออกแบบการนำไปใช้งานของโฟมโลหะ แสดงดังตารางที่ 2.1

การนำไปใช้งาน	วิเคราะห์คุณสมบัติ
Lightweight structure	ความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงเมื่อได้รับแรงดัด
Sandwich cores	ความหนาแน่นต่ำ พร้อมกับความแข็งแรงต่อแรงเฉือนและการแตกหักที่ดี
Mechanical damping	Damping capacity ของโฟมโลหะสูงกว่าโลหะต้นมาก
Acoustic absorption	โครงสร้างที่มีโพรงอากาศของโฟมโลหะมีความสามารถในการดูดซับเสียงที่สูง
Packaging	ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก ณ แรงอัดคงที่
Heat exchanger	โฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดมีพื้นที่ผิวของเนื้อโลหะที่เป็น Cell wall ในการถ่ายเทความร้อนที่สูง
Filter	โฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดที่ทำการควบคุมขนาดโพรงอากาศ
Electrodes and catalyst carrier	มีอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงทำให้มีพื้นที่ในการเก็บประจุ และทำปฏิกิริยาที่สูง

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพในการออกแบบการนำไปใช้งานของโฟมโลหะ [3]

2.2 โฟมอะลูมิเนียม

โฟมอะลูมิเนียม คือ โฟมโลหะที่ผลิตจากอะลูมิเนียม ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโครงข่ายเนื้ออะลูมิเนียมและโพรงอากาศ โฟมอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูงในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทกที่ดี ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำมารีไซเคิลได้

2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

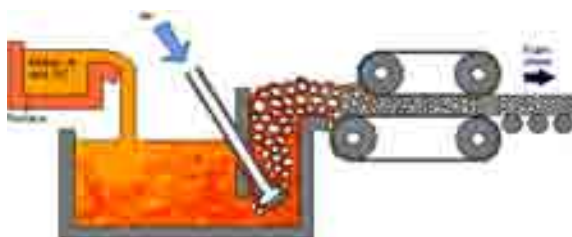
วิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตได้หลายวิธีแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับว่า โครงสร้าง คุณสมบัติ และการนำไปใช้งานของโฟมอะลูมิเนียมเป็นอย่างไร

2.3.1 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด

2.3.1.1 กระบวนการผลิตในสภาวะของเหลวโดยการเป่าแก๊สโดยตรง

(Direct foaming with gas)

ขั้นตอนแรกคือการหลอมอะลูมิเนียม ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่น้อยมาก ส่งผลให้เมื่อเป่าแก๊สเข้าไปฟองแก๊สจะลอยสู่ผิวด้านบนและหายไปจึงไม่เกิดโพรงอากาศตามต้องการ ทำให้ต้องมีการใส่อนุภาคเซรามิกเช่น อะลูมินา (Al_2O_3), ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) หรือ ไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า $26\ \mu m$ ลงไป 5-15 Vol.% ส่งผลให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความหนืดมากขึ้น เพื่อหน่วงการลอย การขยายตัว และการแตกของฟองแก๊ส ซึ่งอาจเรียกว่าเป็นการเพิ่มเสถียรภาพ ขั้นตอนต่อมา เติมน้ำโลหะอะลูมิเนียมจากเตาหลอมลงในอ่าง ทำการเป่าแก๊สตรงกันอ่าง ซึ่งท่อที่ใช้ทำการเป่าแก๊สนั้นจะมีใบพัด โดยหมุนอยู่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง เพื่อป้องกันมิให้เกิดการไหลของน้ำโลหะคล้ายกับน้ำวน (Vortex) เนื่องจากน้ำวน นี้จะทำให้ฟองแก๊สถูกดูดกลับหายเข้าไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียม ขั้นตอนสุดท้าย หลังจากเป่าแก๊สแล้วก็จะดึงและรีดออกมาให้เป็นแผ่นและทำให้เย็นตัว ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะแสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.2

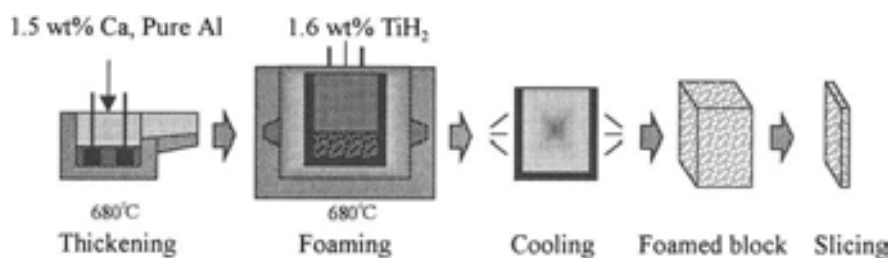


ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตในสภาวะของเหลวโดยการเป่าแก๊สโดยตรง [4]

2.3.1.2 กระบวนการผลิตในสภาวะของเหลวโดยการสลายตัวของสาร

ปล่อยแก๊ส (Direct foaming with blowing agent)

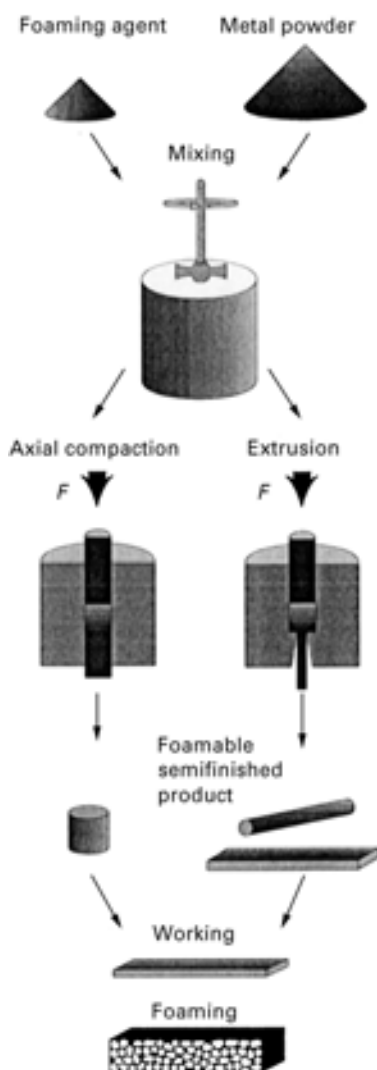
มีขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรกทำการหลอมอะลูมิเนียมที่ $670 - 690^\circ C$ เติมแคลเซียม (Ca) 1 – 2 wt.% เพื่อเพิ่มความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม เพื่อหน่วงการลอย, การขยายตัว และการแตกของฟองแก๊ส ขั้นต่อมาทำการร่อนน้ำโลหะอะลูมิเนียมในอัตราคงที่ ระหว่างนั้นเติมสารปล่อยแก๊ส (Blowing agent) โดยส่วนใหญ่จะใช้ไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) เมื่ออนุภาค TiH_2 เกิดการสลายตัวเกิดฟองแก๊สไฮโดรเจนในน้ำโลหะอะลูมิเนียม หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว[5] กระบวนการผลิตแสดงไว้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตในสถานะของเหลวโดยการสลายตัวของสารปล่อยแก๊ส [5]

2.3.1.3 กระบวนการผลิตในสถานะของเหลวโดยกรรมวิธีโลหะผง (Powder compact melting)

กระบวนการผลิตเริ่มจากผสมผงอะลูมิเนียมกับสารปล่อยแก๊ส ซึ่งในกระบวนการนี้ใช้ TiH₂ เมื่อผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จะถูกนำไปอัดขึ้นรูป ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วเรียกว่า “Precursor” จากนั้นนำ Precursor ใส่แม่พิมพ์แล้วเข้าเตาอบ ซึ่งการให้ความร้อนของเตาอบ จะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ในขณะที่ Precursor ถูกอบอยู่ในเตา TiH₂ เกิดการสลายตัวที่ 400-450°C เกิดแก๊สไฮโดรเจนออกมา Precursor ที่หลอมเหลวเกิดการขยายตัวขึ้นในแม่พิมพ์ สุดท้ายได้โฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดที่มีรูปร่างเช่นเดียวกับแบบของแม่พิมพ์ [6] ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงไว้ดังภาพที่ 2.4



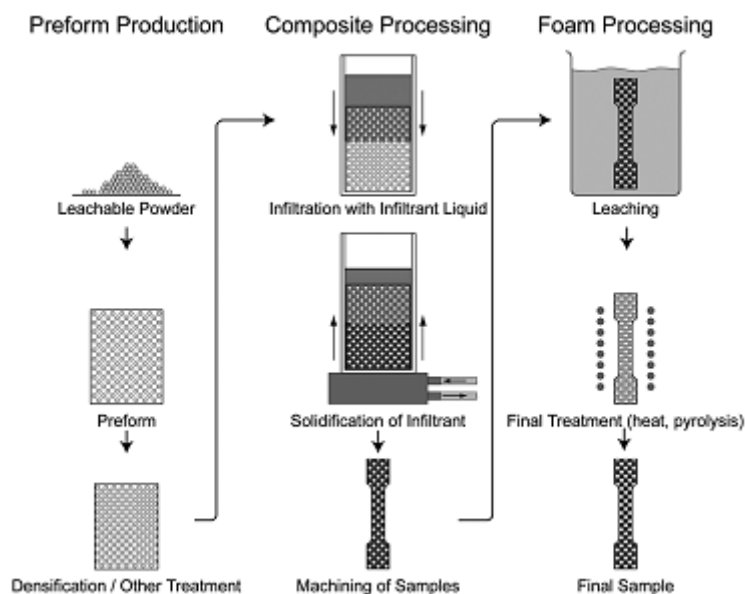
ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง [6]

2.3.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด

2.3.2.1 กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการถอดแบบ (Replication Process) โดยใช้แม่พิมพ์เกลือ

กระบวนการผลิตขั้นต้นแรกคือการทำชิ้นงานตั้งต้น หรือเรียกว่า “Preform” โดยการนำวัสดุผงที่สามารถละลายน้ำได้ หรือล้างออกได้ โดยส่วนใหญ่ใช้ผงเกลือ (NaCl) นำมาอัดขึ้นรูปแล้วนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความหนาแน่นและให้เม็ดเกลือแต่ละเม็ดเชื่อมติดกัน เมื่อได้ Preform มาแล้ว ขั้นตอนต่อไปทำการฉีดน้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างผงเกลือของ Preform หลังจากนั้นนำ Preform ที่ทำการฉีดแล้ว ไปละลายเอาผงเกลือออก

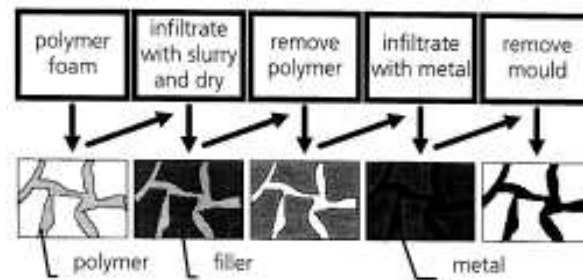
สุดท้ายได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศลักษณะเดียวกันกับผงเกลือ [7] ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงไว้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการถอดแบบโดยใช้แม่พิมพ์เกลือ [7]

2.3.2.2 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น (Investment casting)

กระบวนการผลิตเริ่มต้นจากเตรียมต้นแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยจะใช้โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane foams) ซึ่งเป็นโฟมพอลิเมอร์ หลังจากนั้นจึงเติมน้ำสลিপเซรามิก หรือเรียกว่า “Casting slurry” ต่อมาจึงนำไปให้ความร้อนจน PU foams สลายตัวเกิดเป็นช่องว่าง ทำการหล่อโดยฉีดน้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าสู่ช่องว่าง ปล่อยให้เย็นตัวแล้วจึงนำเอาโฟมอะลูมิเนียมออกมา โฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะเหมือนกับ PU foams ทุกประการ อาจนำไปเผาผนึกต่อไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรง [8]



ภาพที่ 2.6 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น (Investment casting) [8]

2.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อจากแบบพอกหุ่นจากโฟมพอลิเมอร์ (Investment casting with polymer foams)

โฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตได้ด้วยวิธีการหล่อโดยไม่ต้องทำให้เกิดฟองแก๊สโดยตรงต่อน้ำอะลูมิเนียมได้ ซึ่งวิธีที่จะกล่าวต่อไปนี้มีกระบวนการผลิตดังแสดงในภาพที่ 2.6 เริ่มแรกจะใช้โฟมพอลิเมอร์ เช่น โฟมโพลียูรีเทน เป็นต้นแบบ ซึ่งโฟมพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด เพราะถ้าเป็นโครงสร้างรูพรุนแบบปิดจะทำการหล่อด้วยกระบวนการนี้ไม่ได้ หลังจากนั้นจึงเติมน้ำสลิบลงไป น้ำสลิบที่เทลงไปนี้จะทำหน้าที่เสมือนแม่พิมพ์ น้ำสลิบที่ใช้ควรมีคุณสมบัติทนความร้อนสูงได้ น้ำสลิบที่ใช้โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเซรามิกมักเรียกว่า “Casting slurry” หลังจากนั้นจึงทำการให้ความร้อนเพื่อที่จะละลายโฟมพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นต้นแบบ สุดท้ายจะได้แม่พิมพ์ที่มีช่องว่างลักษณะเดียวกับโฟมพอลิเมอร์ ต่อมาจึงทำการหล่อโดยการเทน้ำอะลูมิเนียมลงไปในช่วงว่าง ถ้าแม่พิมพ์มีช่องว่างภายในขนาดเล็ก จึงมีการใช้แรงดันช่วยในการหล่อ และอาจจะต้องให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ในระดับหนึ่ง เพื่อที่จะให้น้ำอะลูมิเนียมเติมได้เต็มแบบ ต่อมาจึงทำการเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยการทุบทำลายแม่พิมพ์ ปัญหาของกระบวนการผลิตนี้คือ ความยากในการเติมเต็มแบบของน้ำอะลูมิเนียม การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีนี้มีข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 2.2

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - ระบบไม่ยุ่งยาก - ได้โครงสร้างตามแบบที่ต้องการ - โครงสร้างที่ได้สม่ำเสมอเช่นเดียวกับต้นแบบ - สามารถใช้กับวัสดุได้หลากหลาย 	<ul style="list-style-type: none"> - โรงอากาศขนาดเล็กทำได้ยาก - ทำชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ยาก - ผลิตได้เฉพาะโฟมโครงสร้างแบบเปิดเท่านั้น - อัตราการผลิตต่ำ

ตารางที่ 2.2 ข้อดีข้อเสียของกระบวนการผลิตโฟมแบบหล่อแบบพอกหุ่น

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่น

2.5.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีผลต่อการเติมเต็มช่องว่างของน้ำโลหะอะลูมิเนียม ถ้าให้ความร้อนอะลูมิเนียมให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย เมื่อทำการหล่อน้ำโลหะก็จะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้หล่อไม่เต็มแบบ แต่ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะลดลง การที่จะหล่อให้เต็มแบบได้ดีนั้นอุณหภูมิหล่อเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลเกี่ยวข้องกับกับความหนืด จากสมการของ Arrhenius

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.3)$$

ซึ่งค่า η คือความหนืดมีหน่วยเป็น MPa/s

η_0 คือค่าคงที่ pre – exponential ของความหนืด

E_a คือค่า activation energy

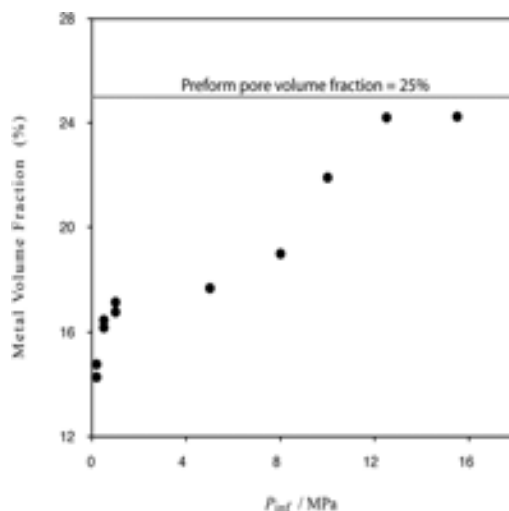
R คือค่าคงที่ของแก๊ส

T คืออุณหภูมิ [29]

ซึ่งการใช้อุณหภูมิที่ใช้ผลิตโฟมอะลูมิเนียมสูงกว่าจุดหลอมเหลวในระดับที่เหมาะสม การเติมเต็มแบบก็จะเป็นไปด้วยดี แต่ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมสูงเกินไป การเติมเต็มแบบก็จะเป็นไปด้วยดีเช่นกัน แต่จะเกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน และอาจจะมีผลกระทบต่อผิววัสดุ หลังจากการหล่ออีกด้วยเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน สรุปก็คือการใช้อุณหภูมิในการหล่อควรจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม

2.5.2 ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม

ความดันที่ใช้ นั้น สัมพันธ์กันกับขนาดของโพรงอากาศของต้นแบบ ความเรียบของผิวข้างในแม่พิมพ์ จากการศึกษาการผลิตโฟมอะลูมิเนียมแบบหล่อโดยใช้แม่พิมพ์เกล็ดจะเห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ของการใช้ความดันที่เพิ่มขึ้นต่ออัตราส่วนปริมาตรของอะลูมิเนียมของโฟมที่ผลิตได้ ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่า โฟมที่มีความหนาแน่นสูงความดันที่ใช้ในการผลิตก็จะสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟม ต่อความดันที่ใช้ในการแทรกซึม [7]

การให้ความดันควรให้ในระดับที่เหมาะสม ถ้าน้อยเกินไปน้ำอะลูมิเนียมก็จะเติมไม่เต็มแบบ แต่ถ้าให้ความดันมากเกินไป อาจเกิดความเสียหายต่อแม่พิมพ์และเครื่องมือได้

2.5.3 เวลาที่ใช้ในการให้ความดัน

การให้ความดัน ถ้าให้ความดันในเวลาที่น้อยเกินไป น้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะเติมไม่เต็มแบบ ในทางตรงกันข้าม ถ้าให้ความดันในเวลาที่นานเกินไปอาจทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมดันแม่พิมพ์จนเกิดการเสียหาย และอาจเกิดการรั่วซึมได้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

2.5.4 วัสดุที่ใช้ในการผลิตต้นแบบ

วัสดุที่ใช้ผลิตต้นแบบนั้น คือโฟมพอลิเมอร์ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้โฟมโพลียูรีเทน ซึ่งโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีจะลักษณะเหมือนกับโฟมต้นแบบทุกประการ วัสดุที่ใช้ผลิตต้นแบบจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะที่ใช้ในการหล่อและยังต้องสลายได้ง่ายเมื่อถูกกำจัดด้วยความร้อน

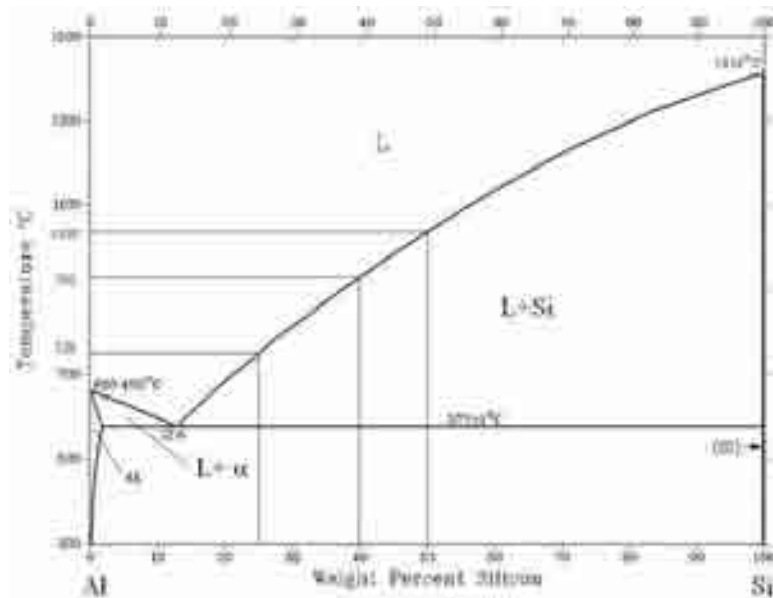
ขนาดโพรงอากาศและความหนาของกึ่งก้านของโฟมโพลียูรีเทนจะมีผลต่อการให้ความดันในการแทรกซึม ความดันที่ใช้จะต้องมากกว่าความดันขีดเริ่ม (Threshold Pressure) ซึ่งก็คือความดันที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลเข้าแบบได้ ค่าความดันขีดเริ่มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแบบหล่อและความสามารถในการเป็ยกระหว่างวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อกับน้ำโลหะอะลูมิเนียม ถ้าเป็ยกันได้ดีอาจจะไม่ต้องใช้ความดันช่วยในการให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าแบบหล่อ ซึ่งก็คือค่าความดันขีดเริ่มมีค่าติดลบ แต่ถ้าทั้งวัสดุที่ใช้ผลิตแบบหล่อกับน้ำโลหะอะลูมิเนียมเป็ยกันไม่ดีสัก จึงต้องใช้ความดันในการช่วยให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลเข้าแบบได้

ซึ่งความดันที่ใช้ยิ่งสูงกว่าความดันขีดเริ่มมากเท่าไรน้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะเต็มเต็มแบบได้มากขึ้น ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้กับอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโพมภาพที่ 2.7 [7]

2.5.5 วัสดุที่ใช้ในการผลิตโพมอะลูมิเนียม

วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตโพมโลหะคืออะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมอัลลอย โดยที่ในกระบวนการผลิต อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงจึงใช้พลังงานในการหลอมเหลวสูง การเติมธาตุผสมบางตัวเช่น ซิลิคอน จะช่วยในการลดจุดหลอมเหลวลง ดังกราฟในภาพที่ 2.18 โดยที่การผสมซิลิคอนในปริมาณ 12.6 wt.% จะลดจุดหลอมเหลวให้ต่ำที่สุดที่ 577°C ส่งผลให้ใช้พลังงานในการหลอมน้อยลง และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของน้ำอะลูมิเนียม

สำหรับวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียม มีการผสมอนุภาคเซรามิกลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล ซึ่งปริมาณอนุภาคเซรามิกที่ผสมลงไปมีผลต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม โดยที่ความหนืดจะแปรผันตามปริมาณอนุภาคเซรามิกที่เติมลงไป อนุภาคเซรามิกที่ผสมลงไปจะไปขัดขวางการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมส่งผลให้การไหลตัวไม่ดี [20] นั่นคือเมื่อมีปริมาณอนุภาคเซรามิกสูงจะทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความหนืดสูงขึ้น

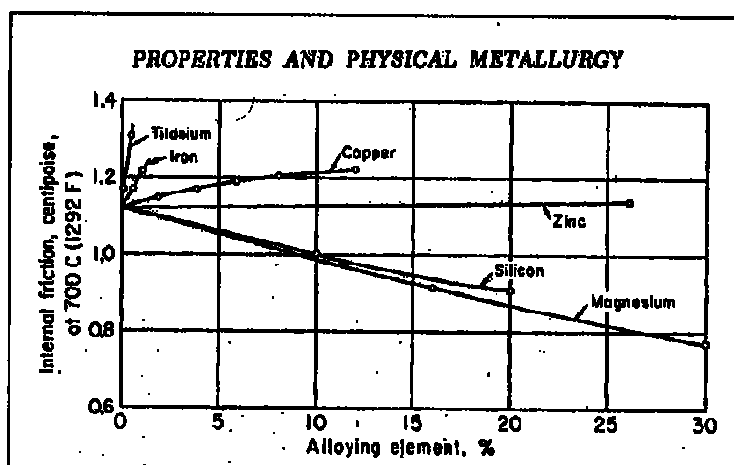


ภาพที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของอะลูมิเนียมที่ซิลิคอน wt.% ต่างๆกัน (Al-Si phase diagram) [9]

2.5.6 ความเหนียวของน้ำโลหะหลอมเหลว

ความเหนียวสูงมีผลต่อการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียม น้ำโลหะอะลูมิเนียมจะไหลผ่านช่องว่างที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กได้ยาก เป็นผลให้เกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะก่อนจะเติมเต็มแบบ เพราะฉะนั้นน้ำโลหะควรจะมีความหนืดต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อาจจะเป็นปัญหาสำหรับการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบางชนิด เพราะขณะหลอมเหลวจะมีความเหนียวสูงมาก

การลดความเหนียวของน้ำโลหะอาจทำได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะดังที่กล่าวมาแล้วหรืออาจทำได้ด้วยการเติมธาตุผสมบางชนิด เช่น Si หรือ Mg เป็นต้น ดังภาพที่ 2.9 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีผลต่อความเหนียวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม



ภาพที่ 2.9 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความเหนียวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [10]

2.6 วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (Metal-matrix composites, MMCs)

2.6.1 ลักษณะของ MMCs

MMCs คือ วัสดุผสมซึ่งมีองค์ประกอบอย่างน้อย 2 ส่วน ส่วนแรกคือเนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งเป็นโลหะ และอีกส่วนคือตัวเสริมแรง (Reinforcement) เป็นโลหะชนิดอื่นหรือวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น เซรามิก เป็นต้น โดยที่ตัวเสริมแรงนั้นมีคุณสมบัติต่างจากเนื้อพื้น ซึ่งตัวเสริมแรงนี้มีผลทำให้คุณสมบัติของวัสดุผสมแตกต่างจากวัสดุเดิมไปในทางที่ดีขึ้น เช่น เพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ, grbj, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และยังเพิ่มคุณสมบัติทางกล ตัวเสริมแรงที่ใช้นั้นโดยส่วนใหญ่ใช้เป็นเส้นใย (Fiber), อนุภาค (Particle) และ whisker

เนื่องจากอะลูมิเนียมมีใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมต่างๆ จุดเด่นของอะลูมิเนียมคือมีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงพอใช้ จึงได้มีการพัฒนาเป็นวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเพื่อให้ใช้งานได้หลากหลายยิ่งขึ้น สำหรับตัวเสริมแรงแบบเส้นใยที่นำมาใช้กับอะลูมิเนียมนั้น ส่วนใหญ่นิยมใช้เส้นใยคาร์บอน เส้นใยซิลิคอน และเส้นใยอะลูมินา ส่วนตัวเสริมแรงแบบอนุภาคและวิสเกอร์นั้น โดยส่วนใหญ่ใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอะลูมินา ตัวเสริมแรงทั้ง 3 แบบนั้นเพิ่มคุณสมบัติทางกลเหมือนกัน แต่จะต่างกันที่เส้นใยจะเสริมแรงเพียงทิศทางตามแนวเส้นใยเท่านั้นโดยจะเสริมแรงได้สูงมากในทิศตามแนวเส้นใย ส่วนอนุภาคและวิสเกอร์นั้นจะเสริมแรงโดยกลไกการขัดขวางของดิสโลเคชัน คุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทางแต่เสริมแรงได้น้อยกว่าเส้นใย วัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมนี้ น้ำหนักเบาจึงนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยานเป็นส่วนใหญ่

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติต่างๆ เช่น ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น, ค่าความหนาแน่นหรือ ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก เป็นต้น กับสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผสมได้จากสมการของกฎแห่งการผสมดังนี้

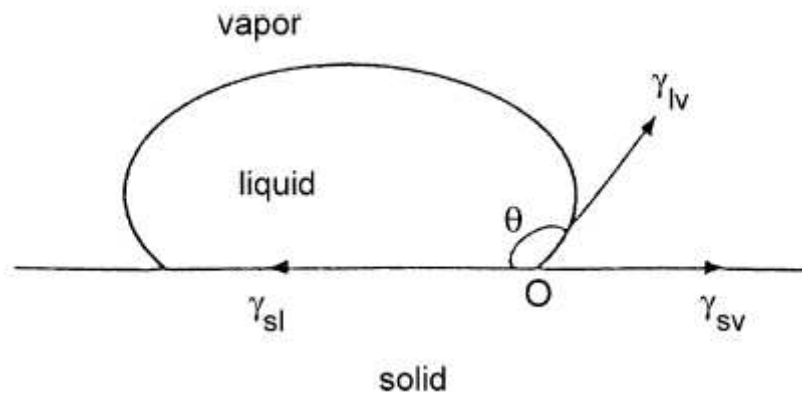
$$P_c = P_m V_m + P_p V_p \quad (2.4)$$

- โดยที่ P_c = คุณสมบัติใดๆของวัสดุผสม
 P_m = คุณสมบัติใดๆของเนื้อพื้น
 P_p = คุณสมบัติใดๆของอนุภาคเสริมแรง
 V_m = สัดส่วนปริมาตรของเนื้อพื้น
 V_p = สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคเสริมแรง [11]

2.6.2 กระบวนการผลิต MMCs

2.6.2.1 กรรมวิธีการผลิตในสภาพของเหลว (Liquid state processing)

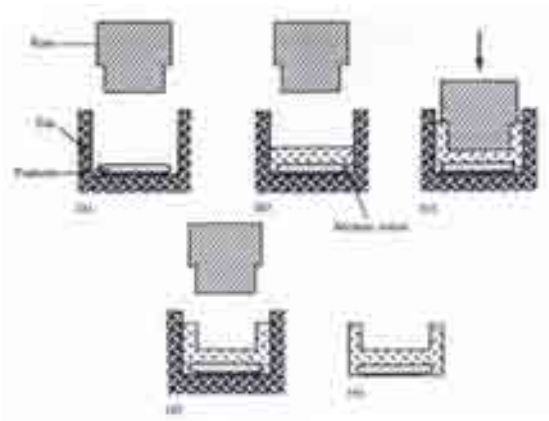
เป็นการผลิตวัสดุผสมในสภาวะของเหลว โดยการผลิตที่ธรรมดาที่สุดคือการกวนขณะหลอม (Mechanical Stirring) เป็นวิธีที่ใช้ผสมผงอนุภาค, วิสเกอร์ หรือเส้นใยสั้นลงไปกับโลหะหลอมเหลว และกวนให้เข้ากัน อุปสรรคสำคัญของวิธีนี้คือการที่จะกวนให้เนื้อวัสดุเข้ากันนั้นทำได้ยาก เนื่องจากคุณสมบัติการเปียก (Wettability) ระหว่างผงอนุภาคกับน้ำโลหะหลอมเหลวที่ไม่ดี ซึ่งการเปียกที่ไม่ดีนั้นจะส่งผลให้อนุภาคก็จะถูกผลักออกไปที่ผิวสัมผัสของน้ำโลหะ [22] จึงเป็นปัญหาในกระบวนการผลิต



ภาพที่ 2.10 ลักษณะการเปียก [27]

จากภาพที่ 2.10 การที่จะบอกได้ว่าเปียกดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของมุมสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (Contact Angle, θ) ถ้า θ มีค่าเท่ากับ 0 จะเป็นการเปียกโดยสมบูรณ์ แต่ถ้าหากว่า θ มีค่าเท่ากับ 180 จะไม่มีการเปียกกันเกิดขึ้น แต่ถ้า θ อยู่ระหว่าง 0 ถึง 180 จะเป็นการเปียกกันบางส่วน การผลิตด้วยวิธีนี้ให้ได้ดีนั้นจำเป็นต้องปรับปรุงในเรื่องของการเปียกกันระหว่างวัสดุเสริมแรงกับน้ำโลหะหลอมเหลว ทำได้โดยใช้การเติมธาตุผสมที่มีสมบัติช่วยเพิ่มคุณสมบัติการเปียก (Surface – Active Element) ทำการเคลือบ ออกซิไดส์ หรือทำความสะอาดวัสดุเสริมแรงเพื่อเพิ่มความสามารถในการเปียก [27] เมื่อปรับปรุงความสามารถในการเปียกแล้วทำให้ θ ระหว่างอนุภาคกับน้ำโลหะหลอมเหลวมีค่าลดลง จึงเกิดการเปียกกันบางส่วนแต่ไม่ถึงกับเปียกดีมาก ทำให้วัสดุเสริมแรงไม่ถูกผลักไปที่บริเวณผิวสัมผัสของน้ำโลหะทั้งหมด ยังคงมีวัสดุเสริมแรงอีกส่วนหนึ่งยังคงอยู่ในเนื้อโลหะ [22] ส่งผลให้ง่ายต่อการผลิตด้วยการกวนมากขึ้นทั้งยังสามารถผลิตวัสดุผสมให้มีการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงที่ดีได้

เทคนิคต่อไปคือการหล่อแบบบีบอัด (Squeeze casting) เหมาะสมการผลิตชิ้นส่วนรูปทรงขนาดเล็ก โดยเริ่มแรกตัวเสริมแรงถูกใส่ไว้ในแม่พิมพ์ เดิมโลหะหลอมเหลวในปริมาณที่พอดี หลังจากนั้นแท่งอัด (Ram) ก็จะอัดโลหะหลอมเหลวเข้าไปในตัวเสริมแรงด้วยแรงดันค่าหนึ่ง คายความดันออกเมื่อโลหะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ กระบวนการผลิตแสดงไว้ดังภาพที่ 2.11 [11]

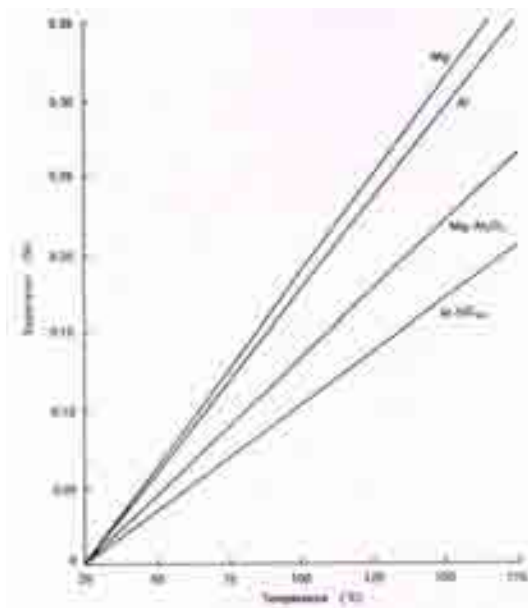


ภาพที่ 2.11 กรรมวิธีการหล่อแบบปั๊มอัด [11]

2.7 คุณสมบัติของ MMCs

2.7.1 สมบัติทางกายภาพ

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยทั่วไปของโลหะมีค่าสูง ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สิ่งนี้นำไปสู่ปัญหาในชิ้นงาน ในทางตรงกันข้าม เซรามิกที่เป็นตัวเสริมแรงมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่ามาก สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยรวมของวัสดุผสมจึงลดลง ดังภาพที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวกับอุณหภูมิของโลหะอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมทั่วไปเปรียบเทียบกับวัสดุผสม [11] ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุผสมจะมีเปอร์เซ็นต์ในการขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าวัสดุปกติที่ไม่ได้ผสมอะไรเลย



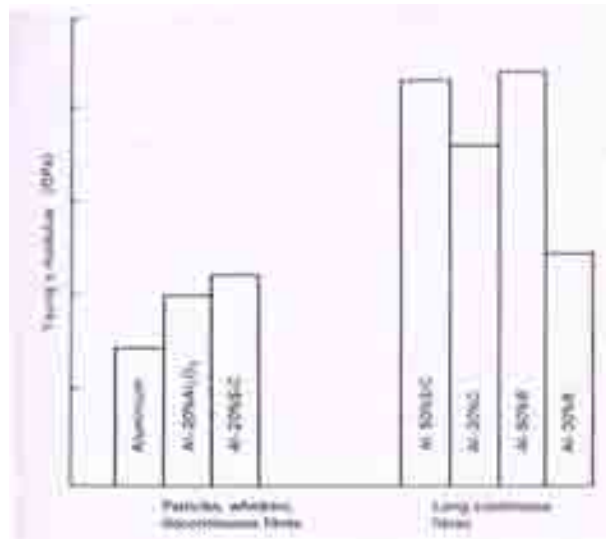
ภาพที่ 2.12 การเปรียบเทียบการขยายตัวทางความร้อนของโลหะและ MMCs [11]

ด้วยเหตุผลเดียวกันนำมาใช้กับเรื่องของการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ ค่าการนำความร้อนและไฟฟ้าของตัวเสริมแรงต่ำกว่าโลหะมาก ดังนั้นในวัสดุผสมจึงมีค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนต่ำกว่าวัสดุทั่วไปที่ทำมาจากโลหะชนิดเดียวกัน ดังนั้นการนำไปใช้งานเฉพาะด้านจึงควรพิจารณาสมบัติของวัสดุผสมให้เหมาะสม

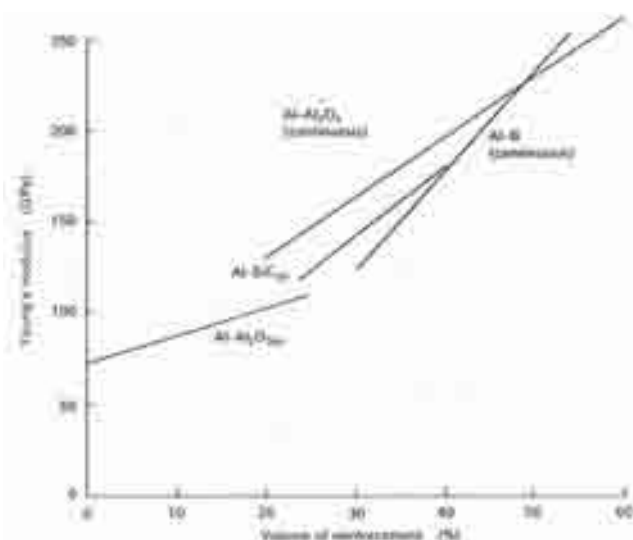
2.7.2 สมบัติทางกล

2.7.2.1 คุณสมบัติอิลาสติก (Elastic properties)

ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในวัสดุโลหะที่ได้รับการเสริมแรง ดังภาพที่ 2.13 แสดงให้เห็นผลของตัวเสริมแรงและปริมาณของตัวเสริมแรงต่อค่ามอดุลัสของยังของอะลูมิเนียมและวัสดุผสม และภาพที่ 2.14 แสดงให้เห็นเช่นเดียวกันและมีการเปรียบเทียบของตัวเสริมแรงแบบเส้นใยต่อเนื่องและอนุภาค [11] ซึ่งจากกราฟทั้งสองจะเห็นได้ว่าอะลูมิเนียมที่การผสมเซรามิกจะมีค่ามอดุลัสของยังที่สูงขึ้นซึ่งเซรามิกที่ผสมลงไปแบบเส้นใยจะมีค่ามอดุลัสของยังสูงกว่าแบบอนุภาค



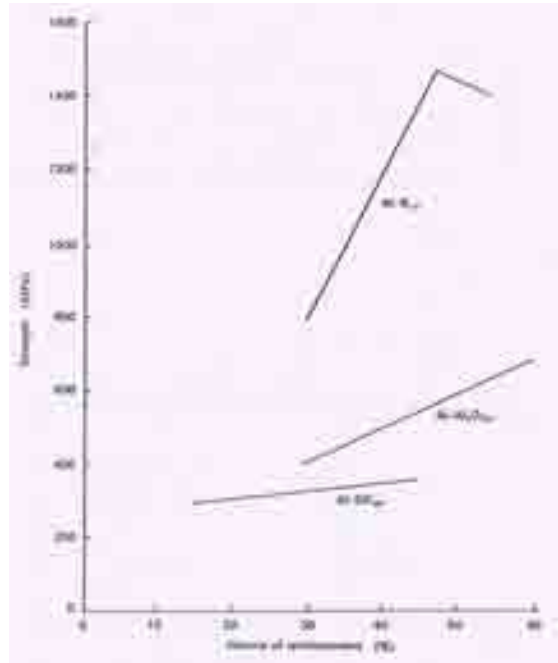
ภาพที่ 2.13 ผลของตัวเสริมแรงต่อค่ามอดุลัสของยังของอะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียม [11]



ภาพที่ 2.14 ผลของปริมาณตัวเสริมแรงต่อค่ามอดุลัสของยังของวัสดุผสมอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ [11]

2.7.2.2 ความแข็งแรงและความเหนียวที่อุณหภูมิห้อง

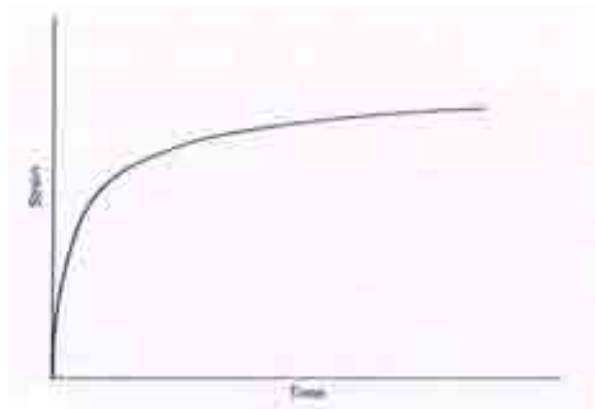
โดยทั่วไปความแข็งแรงของวัสดุผสมจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาตรของตัวเสริมแรง อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการผลิต ทำให้บางครั้งค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อใช้สัดส่วนปริมาตรตัวเสริมแรงสูง ดังตัวอย่างในภาพ 2.15 จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงตามแนวยาวของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องจะมีค่าสูงกว่าวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยผงอนุภาคที่มีปริมาณตัวเสริมแรงเท่ากัน [11]



ภาพที่ 2.15 ผลของปริมาตรของตัวเสริมแรงต่อความแข็งแรงของวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย
ต่อเนื่องและผงอนุภาค [11]

2.7.2.3 คุณสมบัติที่อุณหภูมิสูง

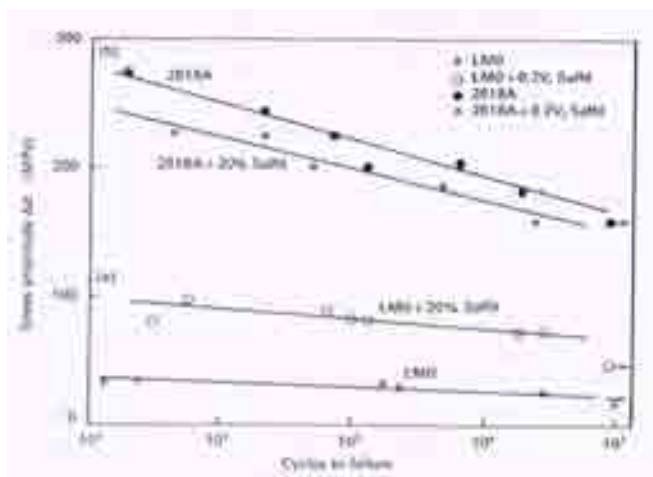
ในการใช้งานจริงการใช้งานที่อุณหภูมิสูง วัสดุอยู่ในสภาวะความเค้นเป็นเวลานาน จึงต้องพิจารณาสมบัติความต้านทานการคืบของวัสดุ (Creep) คือการเพิ่มขึ้นของความเครียดเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากความทนทานต่อการเปลี่ยนรูปของตัวเสริมแรง อัตราความคืบของเส้นใยแทบจะละลายได้เมื่อเทียบกับเนื้อพื้น เป็นเหตุให้อัตราความคืบของวัสดุจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นอัตราความคืบของวัสดุผสมจึงน้อยมาก แสดงดังภาพ 2.16 [11]



ภาพที่ 2.16 อัตราความคืบของ MMCs [11]

2.7.2.4 ความต้านทานความล้า

ความล้าหมายถึงความเสียหายของชิ้นงานภายใต้การใช้งานในความเค้นที่ซ้ำๆ การแตกหักจะเกิดจากตำแหน่งที่เป็นจุดบกพร่องภายใน อาจเป็นตำแหน่งที่ไม่มีการยึดเหนี่ยวที่ดีของตัวเสริมแรงและเนื้อพื้น การเสริมแรงโซ่จะเพิ่มความต้านทานความล้าได้เสมอไป อย่างไรก็ตาม มีการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงนั้นทำให้ความต้านทานความล้าลดลงได้ดังภาพที่ 2.17 [11]



ภาพที่ 2.17 กราฟความล้าของโลหะอะลูมิเนียมผสมและวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยอะลูมินา

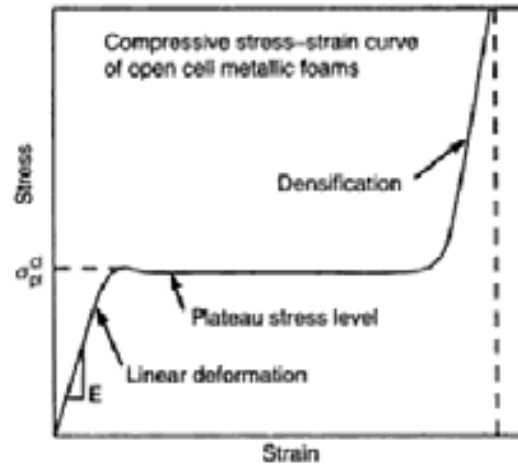
[11]

จากกราฟจะเห็นได้ว่า LMO เมื่อเพิ่มอนุภาคลงไป จะสามารถเพิ่มความต้านทานความล้าได้ แต่ 2618A เมื่อผสมอนุภาคลงไปจะลดความสามารถในการต้านทานความล้า

2.8 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ

การนำไปใช้งานของโฟมอะลูมิเนียมโดยส่วนใหญ่มักนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในงานประเภทรับแรง ในการศึกษาจึงเน้นไปที่คุณสมบัติการรับแรงอัด และความสามารถในการดูดซับแรงอัด

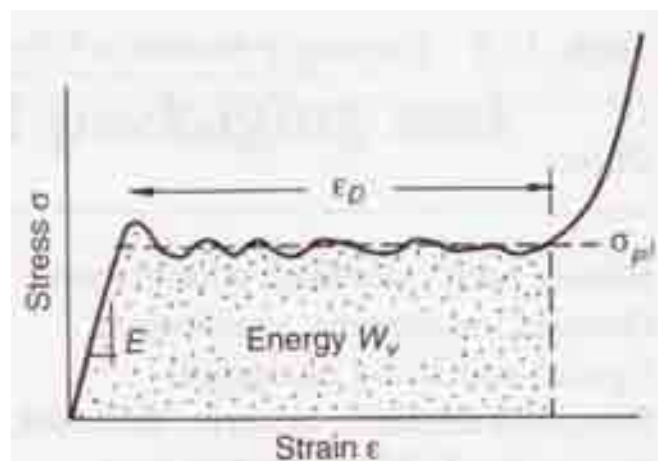
การรับแรงอัดของโฟมโลหะโดยทั่วไปเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัด 3 ขั้นตอน คือ การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) บริเวณที่ราบ (Plateau stress) และช่วงการอัดแน่น (Densification) แสดงไว้ดังกราฟในภาพที่ 2.18 ซึ่งจะเป็นพฤติกรรมการรับแรงอัดแบบอุดมคติ



ภาพที่ 2.18 กราฟความเค้น - ความเครียด ของโฟมโลหะในอุดมคติ [12]

เมื่อโฟมโลหะได้รับแรง ในช่วงแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง เมื่อให้แรงเกินจุดคราก โฟมโลหะจะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงในช่วงบริเวณที่ราบ คือช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดภายใต้ความเค้นคงที่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้ เป็นลักษณะพิเศษของโฟมโลหะ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานประเภทการดูดซับพลังงาน เมื่อให้แรงอัดกับโฟมโลหะจนโพรงอากาศพังตัวจนหมด ก็จะเข้าสู่ช่วงอัดแน่น เป็นช่วงความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เปรียบเสมือนกับการอัดโฟมโลหะจนกลายเป็นโลหะตัน

ในส่วนของความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกคือพื้นที่ใต้กราฟในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบริเวณที่ราบ (Plateau)



ภาพที่ 2.19 กราฟความเค้น - ความเครียด สำหรับการหาค่าความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก [13]

ซึ่งค่า ε_D (Densification Strain) หาได้ดังสมการที่ 2.5

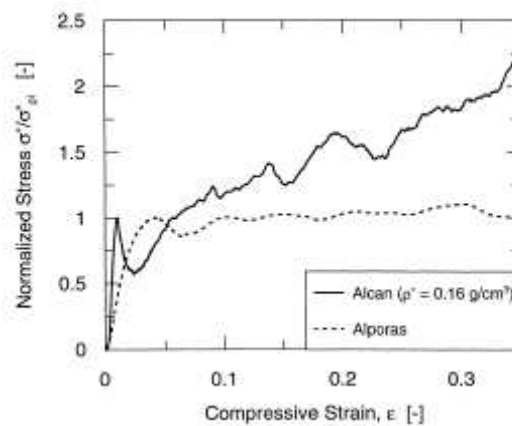
$$\varepsilon_D = 0.8 - 1.75(\rho_f/\rho_s) \quad (2.5)$$

โดยที่ ρ_f คือ ความหนาแน่นของโฟมโลหะ

ρ_s คือ ความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ [13]

2.8.1 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มี 3 ขั้นตอนเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ลักษณะกราฟความเค้น-ความเครียด เป็นดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 กราฟความเค้น-ความเครียด ของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดที่ความหนาแน่น 0.16 g/cm³ [14]

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีการเปลี่ยนรูปแบบฮิสเทติกและแบบพลาสติกเช่นเดียวกับโลหะทั่วไป จากการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ ได้มีการสร้างสมการเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังแสดงในสมการที่ 2.6

สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงฮิสเทติก ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสัมผัสกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C'_1 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ E^* คือ ค่ามอดุลัสของโฟม

E_s คือ ค่ามอดุลัสของของแข็ง

ρ^* คือ ค่าความหนาแน่นของโฟม

- ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
 C_1, C'_1 คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศ
 Φ คือ อัตราส่วนของเนื้อโลหะในก้านโพรงอากาศ [15]

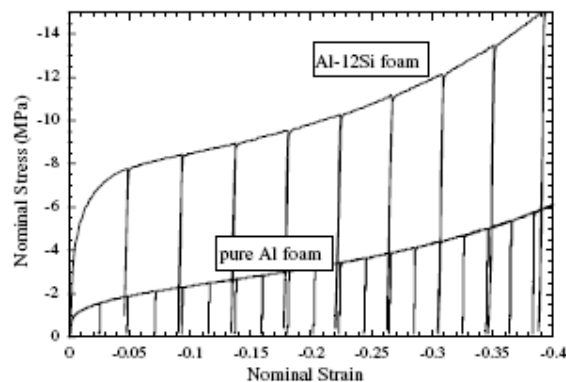
สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลาสติกได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกบริเวณที่ราบ (Plateau stress) ของโฟมกับของแข็งความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \left(\phi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} + C'_2 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.7)$$

- โดยที่ σ_{pl}^* คือ ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟม
 σ_{ys} คือ ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของของแข็ง
 ρ^* คือ ค่าความหนาแน่นของโฟม
 ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
 C_2, C'_2 คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศ
 Φ คือ อัตราส่วนของเนื้อโลหะในก้านโพรงอากาศ [15]

2.8.2 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิด มีลักษณะที่คล้ายกันกับโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด เป็นไปตามกราฟความเค้น-ความเครียด ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และ โฟม Al-12Si ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.27 [16]

พฤติกรรมการรับแรงอัดมีการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก และ แบบพลาสติกเช่นเดียวกับ โครงสร้างแบบปิด สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงอิลาสติก ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัส สัมพัทธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.8)$$

โดยที่	E^*	คือ	ค่ามอดูลัสของโฟม
	E_s	คือ	ค่ามอดูลัสของของแข็ง
	ρ^*	คือ	ค่าความหนาแน่นของโฟม
	ρ_s	คือ	ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
	C_1	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศซึ่งมีค่าประมาณ 1

[2]

สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลาสติกได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกบริเวณที่ราบ (Plateau stress) ของโฟมกับของแข็งและความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.9)$$

โดยที่	σ_{pl}	คือ	ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟม
	σ_{ys}	คือ	ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของของแข็ง
	C_2	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศ
	ρ^*	คือ	ค่าความหนาแน่นของโฟม
	ρ_s	คือ	ค่าความหนาแน่นของของแข็ง [15]

2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

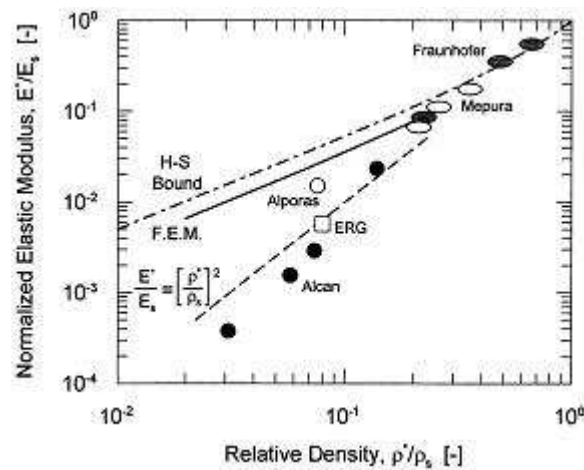
ปัจจัยที่จะกล่าวต่อไปนี้จะเรียงตามลำดับความสำคัญในการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

2.8.3.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิต

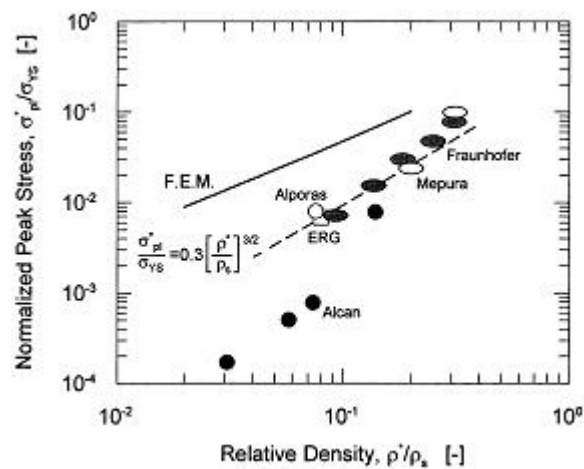
คุณสมบัติของโฟมโลหะนั้น จะขึ้นกับสมบัติของวัสดุที่นำมาผลิต ซึ่งถ้าคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด (Intrinsic Properties) แตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น, ความแข็งแรง ณ จุดคราก, ความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงอัด เป็นต้น คุณสมบัติของโฟมโลหะก็จะต่างกัน

2.8.3.2 ความหนาแน่นสัมพันธ์

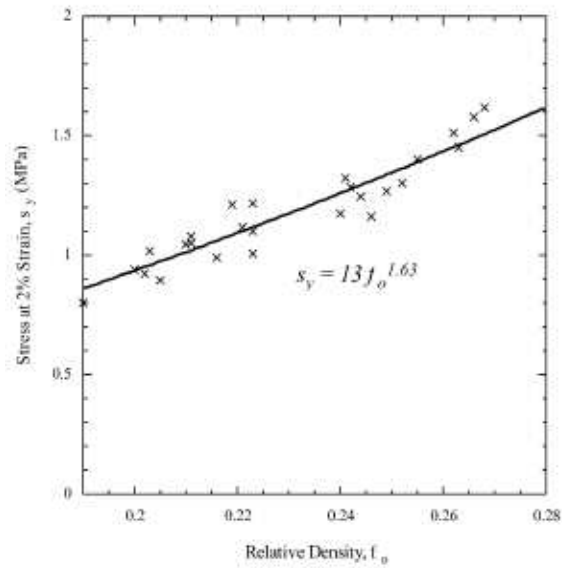
ความหนาแน่นสัมพันธ์ของโฟมโลหะ มีผลต่อคุณสมบัติทางกลโดยตรง โดยที่คุณสมบัติทางกล เช่น มอดูลัสของยัง, ความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงอัด, ความแข็งแรง ณ จุดคราก สูงขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นสัมพันธ์สูงขึ้น ซึ่งแสดงดังกราฟต่อไปนี้



ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพันธ์กับมอดูลัสของยังหรือมอดูลัสยืดหยุ่นของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas [17]



ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพันธ์กับความเค้นสูงสุดของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas [17]

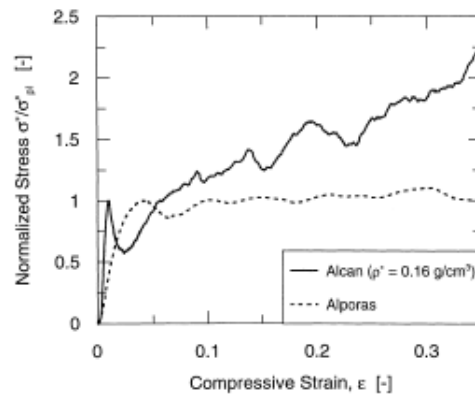
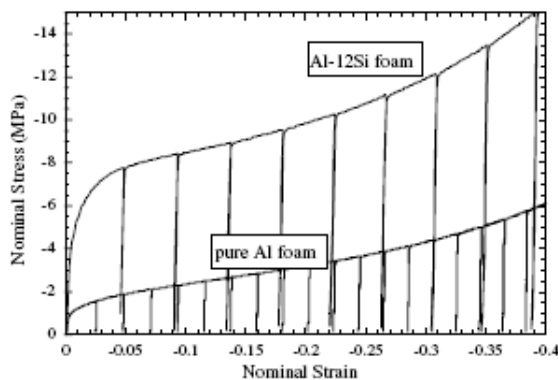


ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความแข็งแรง ณ จุดคราก ของโฟมโลหะ [18]

จากกราฟทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น คุณสมบัติทางกลก็จะดีขึ้นตามไปด้วยแต่มีผลเสียคือน้ำหนักของโฟมโลหะก็จะมากขึ้นด้วย

2.8.3.3 ชนิดโครงสร้างของโฟมโลหะ

โครงสร้างของโฟมโลหะมี 2 แบบคือ โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิดและ โครงสร้างแบบเปิด ความแข็งแรงของโครงสร้างทั้งสองแบบนี้ต่างโดยที่แบบปิดแข็งแรงกว่า เพราะความแข็งแรงต่อหนึ่งโพรงอากาศสูงกว่า เนื่องจากลักษณะของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีลักษณะคล้ายกับมีลูกโป่งอัดอยู่ด้านใน เมื่อให้แรงกระทำที่จะพังได้ก็ต้องอัดลูกโป่งให้แตกก่อน นอกจากนี้การมีผนังโพรงอากาศในโฟมอะลูมิเนียมยังช่วยรับแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 2.25 เปรียบเทียบแรงอัดอัดระหว่าง โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิด และแบบเปิด [14, 16]

จากกราฟด้านบนจะเห็นได้ว่ากราฟทางซ้ายมือเป็นโฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างแบบเปิด ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และ โครงสร้างแบบปิดที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.06 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างแบบปิด มีค่าแรงอัด น้อยกว่าโครงสร้างแบบเปิด เล็กน้อยแต่ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์นั้นน้อยกว่ามาก จึงสรุปได้ว่าโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีความแข็งแรงสูงกว่า และสิ่งที่แตกต่างกันระหว่างทั้งสองกราฟคือ กราฟความเค้น – ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของความเค้นอย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากการที่โพรงอากาศของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดไม่ได้ติดต่อกับโพรงอากาศอื่นๆ จึงเสมือนกับใช้แรงอัดถูกโป่งให้แตก ดังนั้นความเค้นก็จะสูงขึ้นจนถึงจุดที่โพรงอากาศจะพังตัว เมื่อโพรงอากาศพังตัวความเค้นก็จะตกลงอย่างรวดเร็ว เหตุการณ์นี้ก็จะเกิดเป็นวงจรต่อไปจนกระทั่งโพรงอากาศพังตัวหมดทุกโพรง

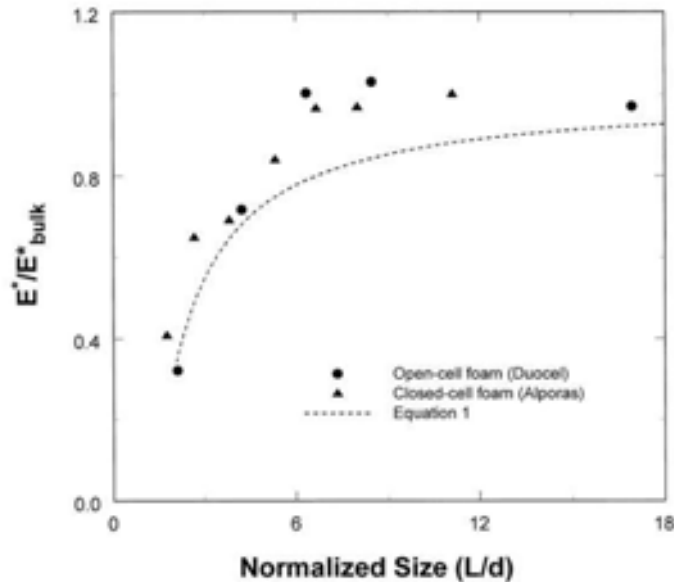
2.8.3.4 ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ

รูปร่างโพรงอากาศที่กลม ขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โฟมโลหะจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุด แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงความหนาแน่นที่เราต้องการผลิต น้ำหนัก และการนำไปใช้งานด้วย เพราะขนาด รูปร่างและการกระจายของโพรงอากาศนั้นสัมพันธ์กันหมด

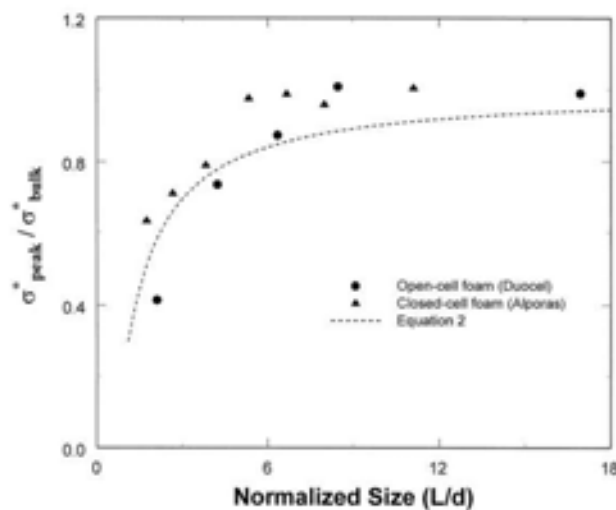
ขนาดและรูปร่างโพรงอากาศนั้น ส่งผลให้สมบัติทางกลของโฟมโลหะ เช่น ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และ ความแข็งแรง แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า ถ้าความหนาแน่นของโฟมโลหะมีค่าเท่ากัน รูปร่างของโพรงอากาศจะส่งผลต่อความแข็งแรงมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของโพรงอากาศก็ยังเป็นตัวแปรสำคัญอยู่ [19] ส่วนการกระจายตัวของโพรงอากาศนั้นจะส่งผลต่อความสม่ำเสมอของความแข็งแรงในชิ้นงานโฟมโลหะ

ขนาดของโพรงอากาศและปริมาณโพรงอากาศต่อหนึ่งหน่วยความยาวของชิ้นงานทดสอบ นั้นมีอิทธิพลเช่นกันซึ่งเรียกว่า Size Effects ซึ่งการที่ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องนั้นและคงที่นั้น ขนาดชิ้นงานทดสอบต้องมีสัดส่วนของความยาวหน้าตัดของโฟมและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศ (L/d) มากพอ ถ้าต้องการทดสอบโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด การที่จะทดสอบให้ได้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงของโฟมคงที่ ค่า L/d เท่ากับ 6 และ 5 ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 2.26 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า L/d ของโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6 ส่วนโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดการที่จะทดสอบให้ได้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงของโฟมคงที่ ค่า L/d เท่ากับ 6 และ 8 ตามลำดับดังแสดงใน

ภาพที่ 2.27 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า L/d ของโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8 [31]



ภาพที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสัมพัทธ์กับ L/d [31]



ภาพที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากสัมพัทธ์กับ L/d [31]

2.8.3.5 ตำแหน่งของโฟมโลหะ (Defects)

ตำแหน่งของโฟมโลหะนั้นมีหลายแบบ เช่น รอยร้าวและรอยโค้งบนผนังโพรงอากาศ รูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟมโลหะ หรือจะเป็นวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ปลอมปนเข้ามา เมื่อโฟมโลหะได้รับแรง จุดที่อ่อนแอที่สุดคือตำแหน่ง เป็นจุดที่เกิดการพังตัวได้ง่ายกว่าที่ควรจะเป็น ถ้าตำแหน่งมีมาก และมีขนาดใหญ่ ความแข็งแรงของโฟมโลหะก็จะต่ำลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 อะลูมิเนียมอินกอตบริสุทธิ์
- 3.1.2 อะลูมิเนียมผสม (Aluminium alloy) เกรด AC3A (JIS)
- 3.1.3 โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane foams) ขนาดโพรงอากาศ 8, 12, 20 ppi
- 3.1.4 เทียน (Wax)
- 3.1.5 ปูนที่ใช้ในงานหล่อยี่ห่อ Old Moon สูตร Standard
- 3.1.6 ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.2 หัวบัดกรี
- 3.2.3 เครื่องแปลงไฟเอนกประสงค์ (Dimmer)
- 3.2.4 ฐานยาง สำหรับขึ้นแบบต้นเทียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว
- 3.2.5 แท่นให้ความร้อน (Hotplate)
- 3.2.6 แผ่นอะลูมิเนียมบาง (Aluminium foil)
- 3.2.7 ครอบเหล็กกล้าปลอดสนิมเจาะรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว
- 3.2.8 เครื่องผสมปูน ยี่ห่อ Old Moon รุ่น IVM 100
- 3.2.9 เครื่องหล่อสุญญากาศ ยี่ห่อ Old Moon รุ่น OMC 102
- 3.2.10 เตาอบครอบปูน ยี่ห่อ Old Moon รุ่น BU 450
- 3.2.11 ตู้ฉีดยาล้างระบบปูน ยี่ห่อ Old Moon รุ่น INC 100
- 3.2.12 เตาหลอมโลหะ (Crucible)
- 3.2.13 โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride)
- 3.2.14 แม่พิมพ์เหล็กกล้าปลอดสนิมทรงครอบเชื่อมด้วยฐานเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางใน 76.30 mm สูง 97.70 mm
- 3.2.15 เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห่อ Hero

- 3.2.16 เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)
- 3.2.17 เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision cutting machine) ยี่ห้อ Struer รุ่น Accutom-5
- 3.2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
- 3.2.19 กระดาษทราย และ ผงเพชร สำหรับขัดชิ้นงาน
- 3.2.20 เบกาไลต์ (Bekalite) สำหรับขึ้นรูปตัวเรือน
- 3.2.21 เครื่องขัดชิ้นงาน
- 3.2.22 เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal testing machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น EZ-S

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมแบบเทียนสำหรับการหล่อ

นำโฟมโพลีเอธิลีนทั้งสามขนาดมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 50 x 25 x 90 mm หลังจากนั้นหลอมเทียนบนเครื่องให้ความร้อนในแผ่นอะลูมิเนียมบางที่ทำขึ้นเป็นถาดสี่เหลี่ยม นำโฟมโพลีเอธิลีนที่ตัดไว้แล้ววางบนเทียนหลอมเหลว หลังจากเย็นตัวแล้ว ได้เป็นโฟมโพลีเอธิลีนที่มีฐานเป็นเทียน จากนั้นจึงนำส่วนนี้ไปติดเป็นต้นเทียนซึ่งมีฐานเป็นยาง โดยใช้หวัดกรีในการติดให้มีลักษณะคล้ายต้นไม้ดังรูป



ภาพที่ 3.1 ต้นเทียนที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิต

3.3.2 การเตรียมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมผสมที่จะผลิตนั้นมีสัดส่วนของซิลิคอนคาร์ไบด์ 1 , 2 , 3 , 4 , 5 wt.% ขึ้น แรกนำผงอะลูมิเนียมอินกอต และอะลูมิเนียมอัลลอยอินกอต (AC3A) ตัดให้มีขนาดพอที่จะใส่ ลงในเบ้าหลอมโลหะได้ ทำการหลอม ที่อุณหภูมิ 750°C ใส่ฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้าเพื่อป้องกันการ เกิดออกซิเดชัน หลังจากนั้น เตรียมซิลิคอนคาร์ไบด์ในแม่พิมพ์ เทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงใน แม่พิมพ์ ทำการกวนด้วยเครื่องกวน (Stirer) เป็นเวลา 4 นาที เมื่ออะลูมิเนียมในแม่พิมพ์เริ่มแข็งตัว จึงเอามาไปเย็นตัวในน้ำ สุดท้ายนำอะลูมิเนียมที่หลอมเสร็จแล้วออกมาจากแม่พิมพ์

3.3.3 การเตรียมอะลูมิเนียมก่อนการทำกรหล่อ

ก่อนทำการหล่อต้องเตรียมอะลูมิเนียมให้พอกับการหล่อแต่ละครั้ง ในการคำนวณจะ คำนวณน้ำหนักของอะลูมิเนียมที่ต้องใช้ ขึ้นแรกชั่งน้ำหนักฐานยาง และวัดปริมาตรบริเวณโคนที่มี ลักษณะเป็นกรวย หลังจากเตรียมแบบเทียนเรียบร้อยแล้ว นำมาชั่งน้ำหนัก หรือน้ำหนักของส่วนที่ เป็นแบบโดยนำน้ำหนักแบบเทียนทั้งหมดลบด้วยน้ำหนักฐานยาง เนื่องจากเทียนมีความหนาแน่น โดยประมาณเท่ากับน้ำซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 g/cm³ เพราะฉะนั้นจึงนำผลลัพธ์ส่วนนี้ไป รวมกับปริมาตรกรวยตรงโคนฐานยาง ก็จะได้เป็นปริมาตรอะลูมิเนียมที่ต้องใช้ทั้งหมด คำนวณ เป็นน้ำหนักตามสมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่น (g/cm³)

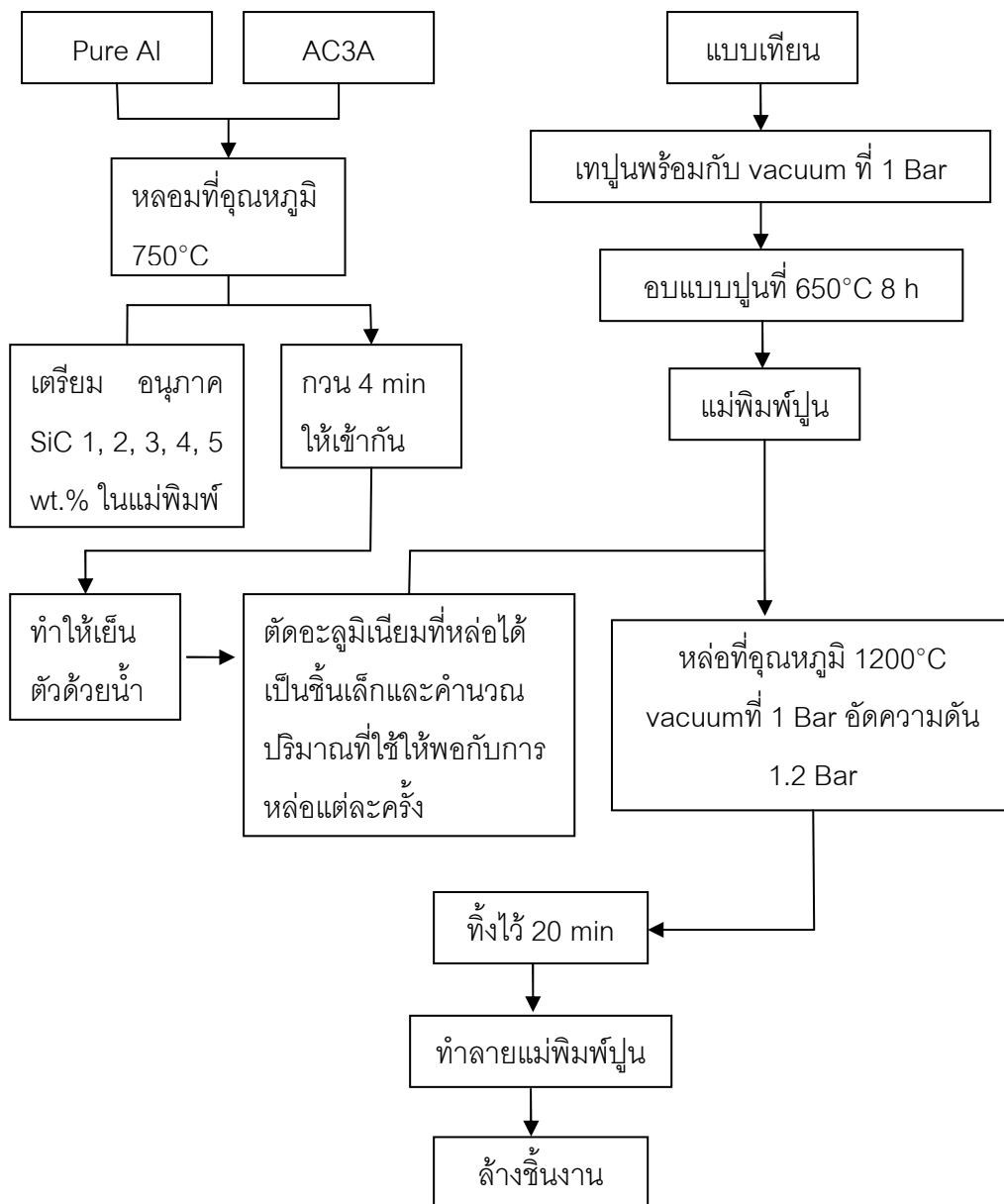
M = มวล (g)

V = ปริมาตร (cm³)

โดยที่ความหนาแน่นของอะลูมิเนียมมีค่า 2.70 g/cm³ แต่ควรเผื่อปริมาณของอะลูมิเนียมที่จะใช้ จากปริมาตรที่คำนวณได้ประมาณ 10%

3.3.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

นำแบบเทียนครอบด้วยกระบอกลีทกกล้าปลอดสนิมเจาะรู ปิดรูด้วยเทปกาว หลังจากนั้นทำการผสมปูนปลาสเตอร์ยี่ห้อ Old Moon สูตร Standard กับน้ำในอัตราส่วน 38:100 ด้วยเครื่องผสมปูนยี่ห้อ Old Moon รุ่น IVM 100 แล้วกวนเป็นเวลา 3 นาที ซึ่งในขณะกวนมีการดูดอากาศออกเพื่อให้เกิดสภาวะสุญญากาศและทำให้เกิดความดันประมาณ 1 Bar ไปด้วย หลังจากนั้นจึงเทลงในกระบอกลีทกกล้าปลอดสนิมที่ครอบแบบเทียนไว้แล้ว ซึ่งในกระบวนการเทปูนทั้งหมดจะทำในระบบสุญญากาศเพื่อให้เนื้อปูนเข้าไปเต็มเต็มในรูของโฟมโพลียูรีเทน หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ปูนแข็งตัว จากนั้นจึงนำแบบปูนไปวางในเตาอบกระบอกลีทกกล้าปลอดสนิมยี่ห้อ Old Moon รุ่น BU 450 ซึ่งเปิดทิ้งไว้ก่อนแล้วจนภายในเตามีอุณหภูมิเป็น 650°C อบแบบปูนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำแม่พิมพ์ปูนที่อบแล้วเข้าเครื่องหล่อสุญญากาศยี่ห้อ Old Moon รุ่น OMC 102 นำอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ใส่ในเครื่อง หลังจากนั้นจึงทำการหล่อโดยลำดับการทำงานของเครื่องเป็นดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.2 เริ่มแรกเครื่องจะทำการดูดอากาศออกเพื่อให้เกิดสภาวะสุญญากาศและทำให้เกิดแรงดันประมาณ 1 Bar เป็นเวลา 20 วินาที ต่อจากนั้นทำการหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 1200°C เมื่ออะลูมิเนียมหลอมหมดและมีอุณหภูมิเป็น 1200°C แล้ว เครื่องจะทำการเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงไปแบบปูน โดยจะเทลงมาก่อน 2.5 วินาที แล้วจึงทำการอัดแรงดันเพื่อไม่ให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดการกระจาย ไม่ลงแบบ การอัดแรงดันจะทำที่ 1.2 Bar โดยจะเข้าไปพร้อมๆกับการดูดอากาศ ซึ่งจะทำเป็นเวลา 300 วินาที จึงนำแบบปูนที่ทำการหล่อแล้วออกจากเครื่อง ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงทำลายแบบปูนด้วยการแช่น้ำ หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกมาล้างเศษปูนออก เป่าให้แห้ง



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตฟิล์มอะลูมิเนียม

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มอะลูมิเนียม

3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานจะเตรียมไว้ 2 แบบคือ แบบแรกทำการตัดฟิล์มอะลูมิเนียมขนาด 1 x 1 x 1 cm ด้วยเครื่อง Precision cutting machine ส่วนอีกแบบหนึ่งทำเช่นเดียวกันกับแบบแรก นำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปทำการขึ้นรูปตัวเรือนแบบร้อน โดยใช้ Bekalite หลังจากนั้นนำไปทำการขัด

หยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 400, 600, 800, 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6, 3, 1 μm หลังจากนั้นผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1-2 g กับน้ำ DI (Distilled Water) 100 ml สำหรับกัดชิ้นงานโคมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และผสมสารละลายระหว่างกรดไนตริก 65% กับน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3 สำหรับกัดชิ้นงานโคมเนื้อพื้น AC3A

3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปตัวเรือนมาตรวจสอบโครงสร้างของโคมอะลูมิเนียม โดยทำการตรวจสอบบริเวณโครงข่ายของเนื้อพื้นอะลูมิเนียม, บริเวณขอบมุม และจุดเชื่อมต่อของโครงข่ายอะลูมิเนียมแต่ละเส้น และตรวจสอบดูเนื้ออะลูมิเนียมเพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคตัวเสริมแรง

3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดขนาด 1 x 1 x 1 cm และชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปตัวเรือนและทำการขัดแล้ว มาตรวจสอบด้วย SEM โดยที่การตรวจสอบจะเริ่มจากการตรวจสอบโครงสร้างโดยทั่วไปจากกำลังขยายต่ำไปสูง เพื่อตรวจสอบบริเวณที่เป็นโครงข่ายของเนื้อพื้นอะลูมิเนียม, บริเวณขอบมุม และจุดเชื่อมต่อของโครงข่ายอะลูมิเนียมแต่ละเส้น

3.5 การทดสอบสมบัติการรับแรงอัดของโคมอะลูมิเนียม

นำโคมอะลูมิเนียมที่ได้ ตัดด้วยเครื่อง Precision cutting machine ให้มีขนาด 20 x 20 x 20 mm นำไปทดสอบการรับแรงอัด โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 1 mm/min เมื่อได้กราฟความเค้นความเครียดจากผลการทดสอบแรงอัด ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปหาค่าสมบัติทางกลของโคมอะลูมิเนียมได้ดังนี้

3.5.1 ความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength)

สามารถหาค่าความแข็งแรง ณ จุดครากได้โดยลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกที่เป็นเส้นตรง ให้ตัดแกนที่ 0.2% ของค่าความเครียด ซึ่งจุดที่เส้นขนานตัดกับกราฟความเค้นความเครียดคือความแข็งแรงจุดคราก มีหน่วยเป็น MPa

3.5.2 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption, E)

สามารถหาค่าการดูดซับพลังงานได้โดยหาพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียดตั้งแต่ค่าความเครียดที่ศูนย์จนถึงค่าความเครียด ณ ช่วงการอัดแน่นดังภาพที่ 2.18 โดยคำนวณจากสมการที่ 3.2 โดยที่ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานมีหน่วยเป็น kJ/m^3

$$E = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \quad (3.2)$$

โดยที่ σ = ความเค้น (MPa)

ε = ความเครียด

ทำการอินทิเกรตจาก 0 ถึงค่า ε_D (Densification Strain) ซึ่งค่า ε_D หาได้จากสมการที่ 2.4

3.6 วิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของตัวเสริมแรงต่อการผลิตโครงสร้าง และคุณสมบัติการรับแรงอัด โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมที่ใส่ตัวเสริมแรงในปริมาณที่มากขึ้น

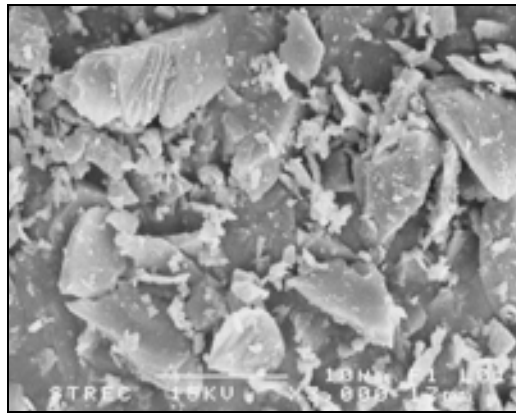
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะของวัสดุ

4.1.1 คุณลักษณะของซิลิคอนคาร์ไบด์

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปร่างของซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวค่อนข้างเรียบ อนุภาคแต่ละอนุภาคแยกตัวออกจากกัน ไม่มีการเกาะติดกัน ผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.38 μm ดังแสดงในตารางที่ 4.1



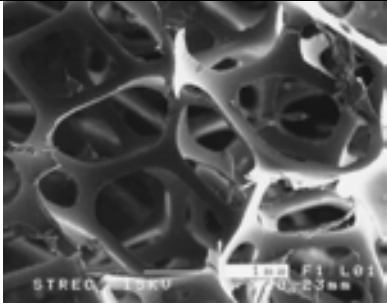
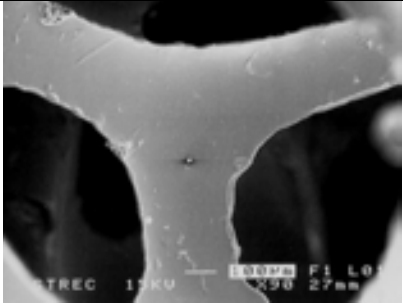
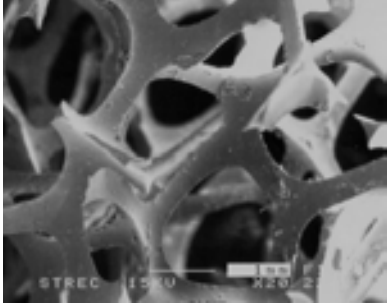
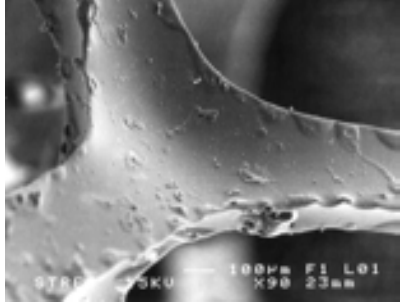
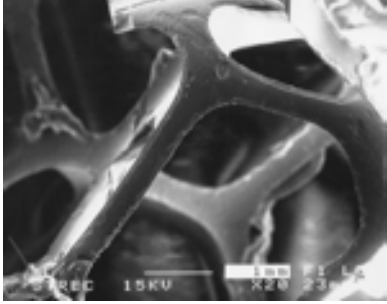
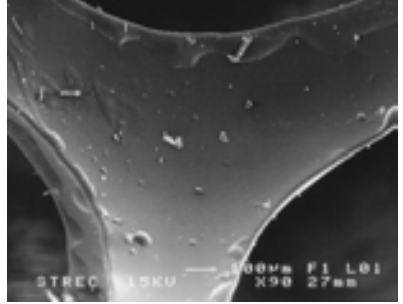
ภาพที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของผงซิลิคอนคาร์ไบด์

Particle	D ₁₀ [μm]	D ₅₀ [μm]	D ₉₀ [μm]	Mean Diameter [μm]
SiC	0.06	0.1	19.78	5.38

ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

4.1.2 คุณลักษณะของโฟมโพลียูรีเทน

โฟมโพลียูรีเทนที่นำมาใช้มี 3 ขนาดคือ 8, 12, 20 ppi นำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ขนาดโครงอากาศและขนาดของก้านโครงอากาศ (Struts) ของโฟมที่มีขนาด 8 ppi จะมีขนาดใหญ่ที่สุด ลักษณะของผิวของก้านโครงอากาศของโฟมมีผิวด้านหนึ่งเว้าลึกลงไป อีกด้านหนึ่งนูนขึ้นซึ่งมีรูปร่างหน้าตัดคล้ายสามเหลี่ยม ผิวด้านนูนของโครงอากาศจะเรียบแต่ก็มีบางจุดที่มีความขรุขระเล็กน้อย ความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนมีค่าดังตารางที่ 4.3 โดยที่โฟมโพลียูรีเทนขนาดโครงอากาศ 20 ppi ซึ่งมีขนาดโครงอากาศเล็กที่สุด มีความหนาแน่นสูงสุดรองลงมาคือ 12 และ 20 ppi ตามลำดับ

กำลังขยาย ขนาดโฟม	20 เท่า	90 เท่า
20 ppi		
12 ppi		
8 ppi		

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมโพลียูรีเทน

Material	Pore Sizes(ppi)	Density (g/cm ³)
PU	8	0.0275
PU	12	0.0307
PU	20	0.0337

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนแต่ละขนาดโพรงอากาศ

4.1.3 คุณลักษณะของอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A

AC3A เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ใช้กันทั่วไปในการหล่อในแม่พิมพ์โลหะ (Die Casting) ตามมาตรฐานของญี่ปุ่นจะมีปริมาณซิลิคอนผสมอยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงจุดยูเทคติกประมาณ 12 wt.% และมีธาตุผสมอื่นๆในปริมาณที่แสดงในตารางที่ 4.3 อะลูมิเนียมชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวไม่เกิน 650°C และยังมีความเหนียวต่ำขณะหลอมเหลวส่งผลให้มีความสามารถในการไหลสูงและมีคุณสมบัติทางกลดีเช่น มีความแข็งแรงจุดครากสูง แต่มีความเหนียวต่ำเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุผสมซิลิคอนในปริมาณสูง

Alloy	wt. %											
	Mg	Cu	Si	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
AC3A	0.015	0.015	12	0.015	0.2	0.015	0.02	0.01	0.015	0.015	0.02	Bal.

ตารางที่ 4.4 ส่วนผสมของอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A

4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม (Macrostructure)

ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมทุกขนาดโพรงอากาศและส่วนผสม โดยทั่วไปโฟมมีโครงสร้างดี มีลักษณะเหมือนโฟมโพลียูรีเทนต้นแบบ แต่ก็ยังมีตำหนิที่มองเห็นได้ เช่น ขอบของก้านโพรงอากาศไม่เรียบ บางส่วนของก้านโพรงอากาศที่เติมไม่เต็มแบบหรือก้านโพรงอากาศบางส่วนหักดังภาพที่ 4.2 (h-l) และมีเศษปูนปลาสเตอร์เหลือค้างบางส่วนติดอยู่บนผิวของก้านโพรงอากาศ ซึ่งเป็นเศษปูนที่หลุดมาจากผนังแม่พิมพ์ขณะหล่อและเหลือค้างจากการล้างทำความสะอาด มีก้านโพรงอากาศบางส่วนที่เกิดการบิดเบี้ยวเล็กน้อยเนื่องจากการ

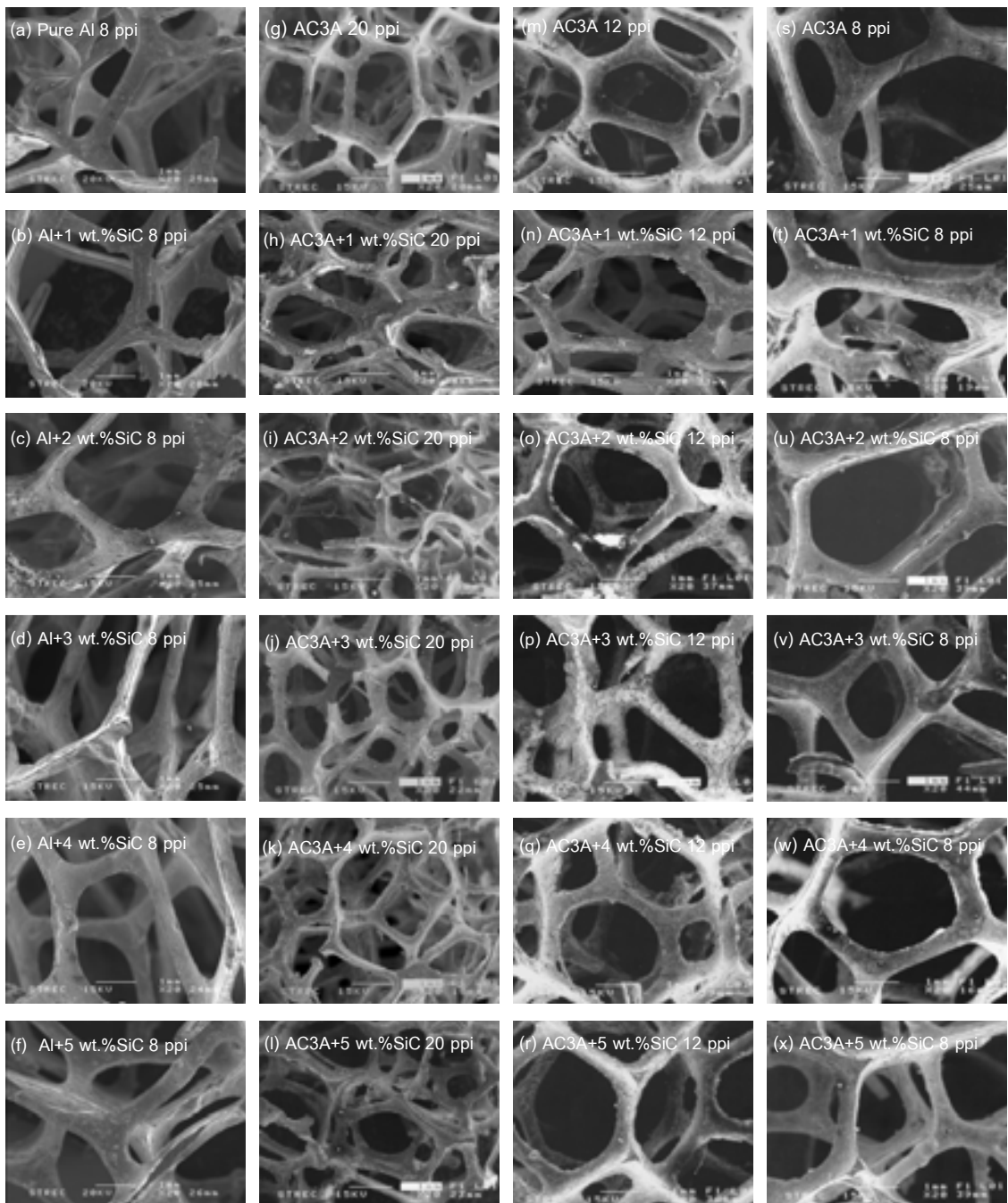
ทำความเข้าใจความสะอาดปูนปลาสเตอร์ด้วยเครื่องฉีดน้ำอัดแรงดัน แต่ก็ไม่พบตำหนิสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล เช่น การผิดรูป รอยร้าวหรือรอยโก่งของผนังโพรงอากาศ เป็นต้น

ภาพที่ 4.3 แสดงพื้นผิวภายในโพรงอากาศของโฟม Pure AI ขนาด 8 ppi ที่ส่วนผสม SiC ในปริมาณที่ต่างๆกัน โดยโฟมที่ทุกส่วนผสมจะมีผิวหยาบและมีเศษปูนเหลือติดค้างบนผิวของภายในโพรงอากาศ จากภาพที่ 4.3 (b-d) อนุภาค SiC มีการกระจายตัว ไม่จับกันเป็นกลุ่ม เนื่องจากปริมาณ SiC ยังมีน้อย แต่เมื่อมีปริมาณ SiC มากขึ้นดังภาพที่ 4.3 (e-f) อนุภาค SiC จับตัวเป็นกลุ่ม กระจายอยู่บนผิวภายในโพรงอากาศ

ภาพที่ 4.4 แสดงพื้นผิวภายในโพรงอากาศของโฟม AC3A ขนาด 20 ppi ที่ส่วนผสม SiC ต่างๆกัน เนื่องจากโฟมขนาด 20 ppi มีขนาดโพรงอากาศที่เล็ก เป็นผลให้ปูนปลาสเตอร์เหลือตกค้างที่ผิวในปริมาณมาก เนื่องจากการล้างทำความสะอาดทำได้ยาก พื้นผิวภายในโพรงอากาศขรุขระเล็กน้อย ขอบภายในโพรงอากาศไม่เรียบ พื้นผิวภายในโพรงอากาศที่ส่วนผสม 1, 2, 3 wt.% SiC ดังภาพที่ 4.4 (b-d) การกระจายตัวของอนุภาค SiC จะอยู่บริเวณขอบภายในโพรงอากาศ แต่อนุภาคจะไม่รวมกลุ่มกัน ส่วนที่ 4, 5 wt.% SiC ดังภาพที่ 4.4 (e-f) การกระจายตัวของ SiC จะอยู่บริเวณขอบภายในโพรงอากาศเช่นกัน แต่อนุภาค SiC จะรวมกลุ่มกันในบางบริเวณ

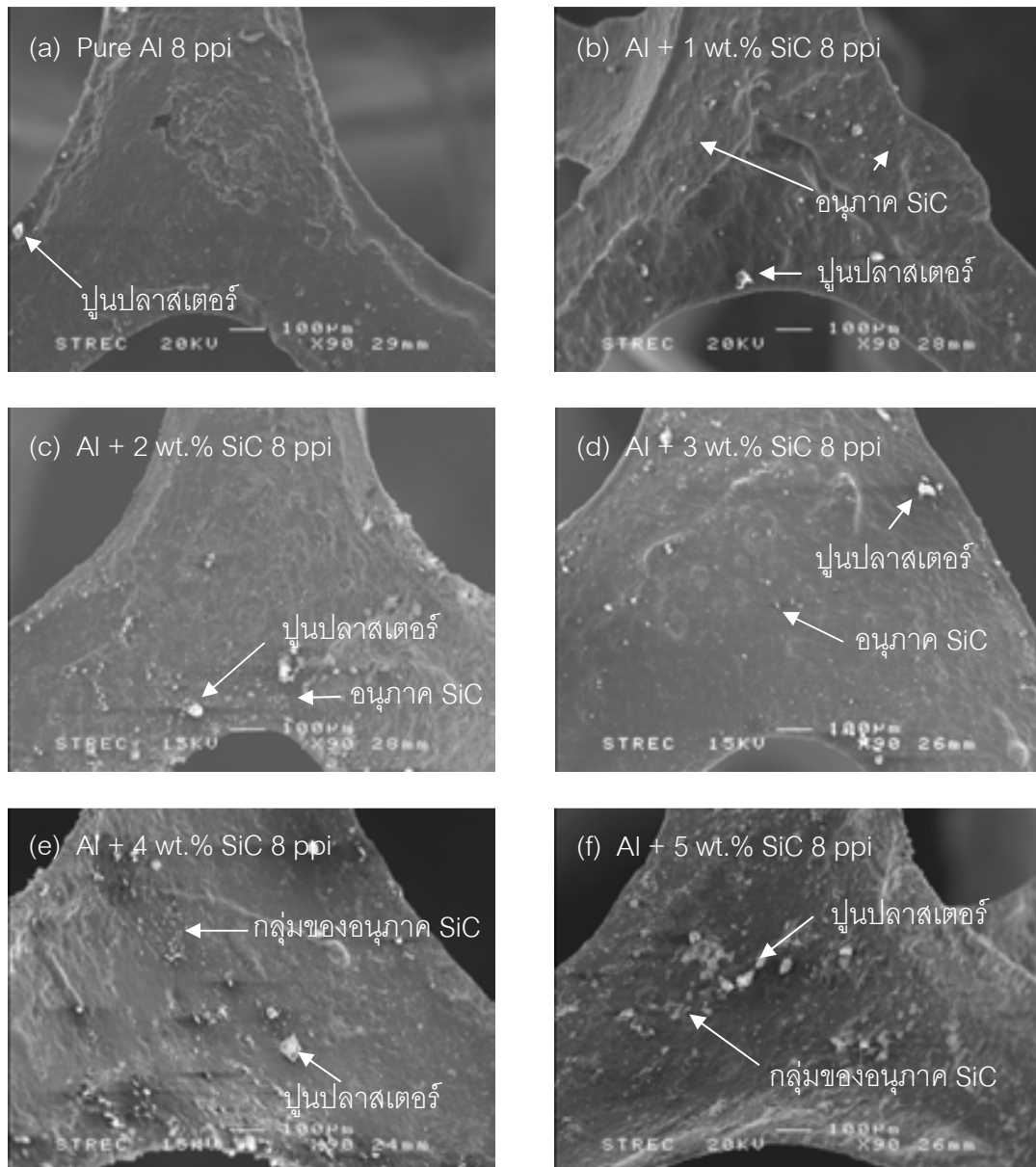
ภาพที่ 4.5 แสดงพื้นผิวภายในโพรงอากาศของโฟม AC3A ขนาด 12 ppi ที่ส่วนผสม SiC ต่างๆกัน พื้นผิวโพรงอากาศค่อนข้างขรุขระและมีปูนปลาสเตอร์เหลือค้างค่อนข้างมากทุกส่วนผสม การกระจายตัวของอนุภาค SiC สังเกตได้ยาก แต่ที่เห็นได้ชัดคือ ที่ปริมาณ SiC สูงดังภาพที่ 4.5 (f) อนุภาคจะรวมตัวเป็นกลุ่ม กระจายอยู่บนผิวผนังโพรงอากาศ

ภาพที่ 4.6 แสดงพื้นผิวภายในโพรงอากาศของโฟม AC3A ขนาด 8 ppi ที่ส่วนผสม SiC ต่างๆกัน พื้นผิวโพรงอากาศขรุขระเล็กน้อย ขอบผนังโพรงอากาศขรุขระเล็กน้อยและมีปูนปลาสเตอร์เหลือตกค้างค่อนข้างมากทุกส่วนผสม การกระจายตัวของอนุภาค SiC สังเกตได้ยาก แต่ที่เห็นได้ชัดคือ ที่ปริมาณ SiC สูงดังภาพที่ 4.6 (f) อนุภาคจะรวมตัวเป็นกลุ่ม กระจายอยู่บนผิวภายในโพรงอากาศ

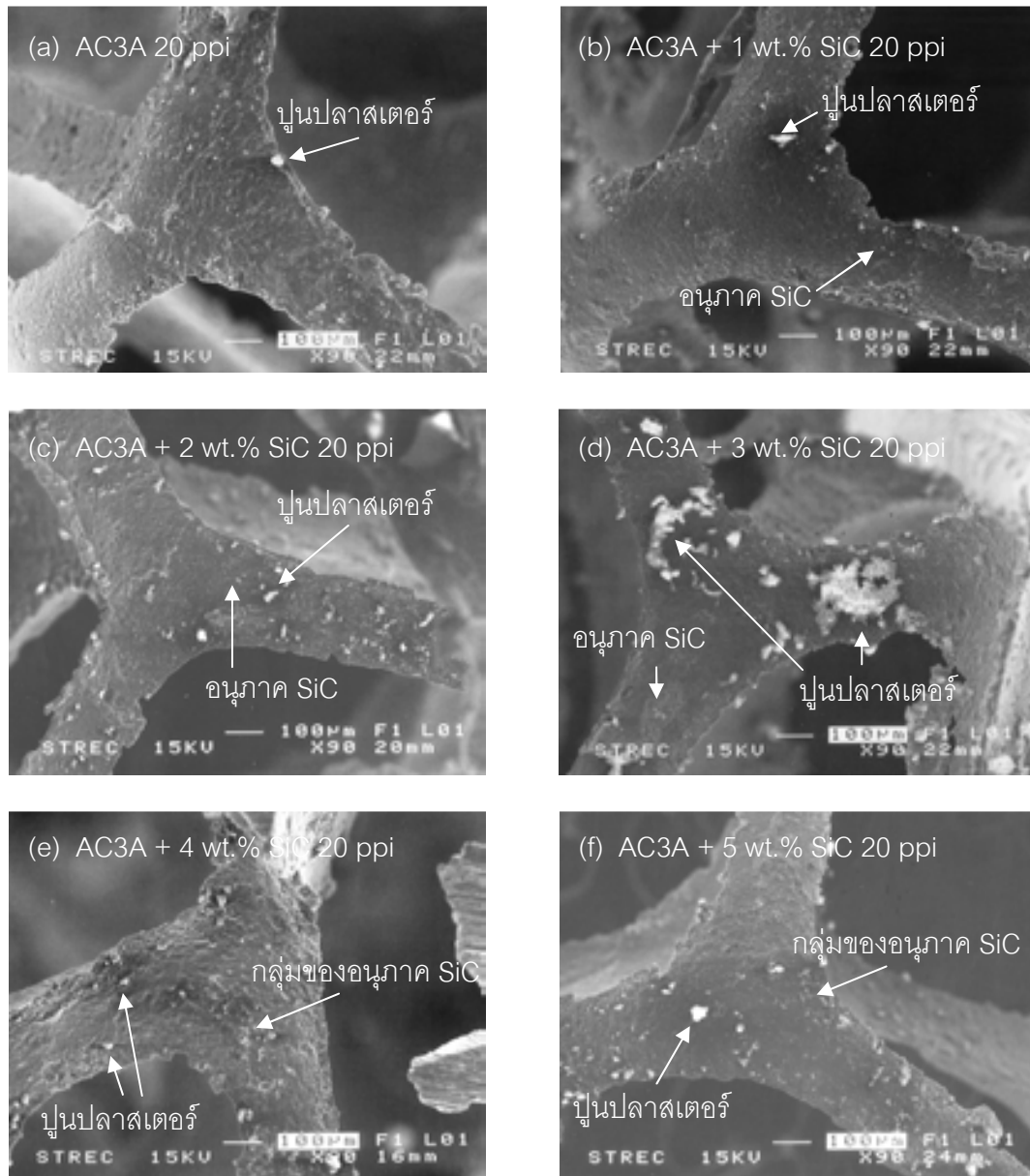


ภาพที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม (a) Pure Al 8 ppi (b) Al + 1 wt.%SiC 8 ppi (c) Al + 2 wt.%SiC 8 ppi (d) Al + 3 wt.%SiC 8 ppi (e) Al + 4 wt.%SiC 8 ppi (f) Al + 5 wt.%SiC 8 ppi (g) AC3A 20 ppi (h) AC3A + 1 wt.%SiC 20 ppi (i) AC3A + 2 wt.%SiC 20 ppi (j) AC3A + 3 wt.%SiC 20 ppi (k) AC3A + 4 wt.%SiC 20 ppi (l) AC3A + 5 wt.%SiC 20 ppi (m) AC3A 12 ppi (n) AC3A + 1 wt.%SiC 12 ppi (o) AC3A + 2 wt.%SiC 12 ppi (p) AC3A + 3 wt.%SiC 12 ppi (q) AC3A + 4

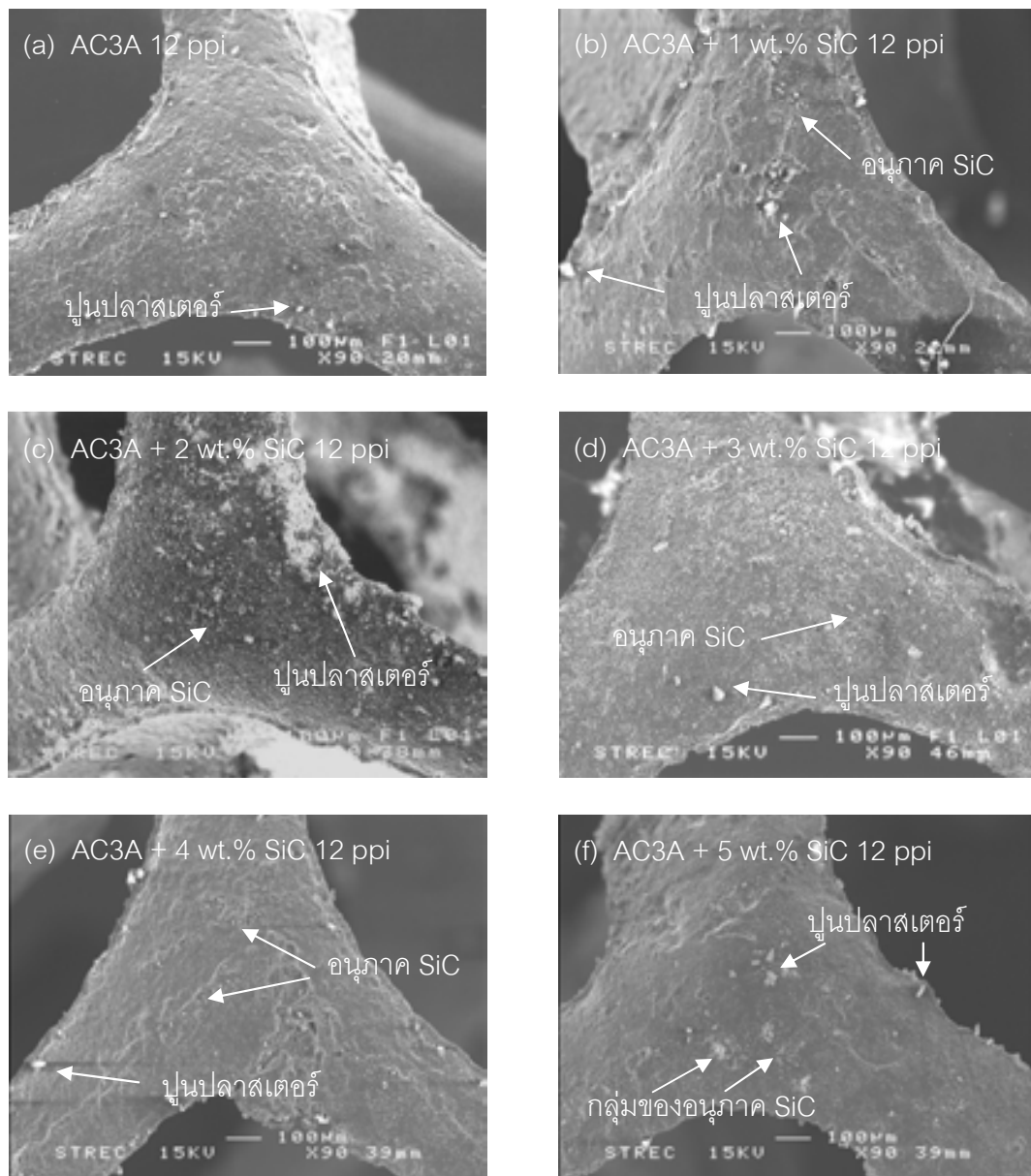
wt.%SiC 12 ppi (r) AC3A + 5 wt.%SiC 12 ppi (s) AC3A 8 ppi (t) AC3A + 1
wt.%SiC 8 ppi (u) AC3A + 2 wt.%SiC 8 ppi (v) AC3A + 3 wt.%SiC 8 ppi (w)
AC3A + 4 wt.%SiC 8 ppi (x) AC3A + 5 wt.%SiC 8 ppi



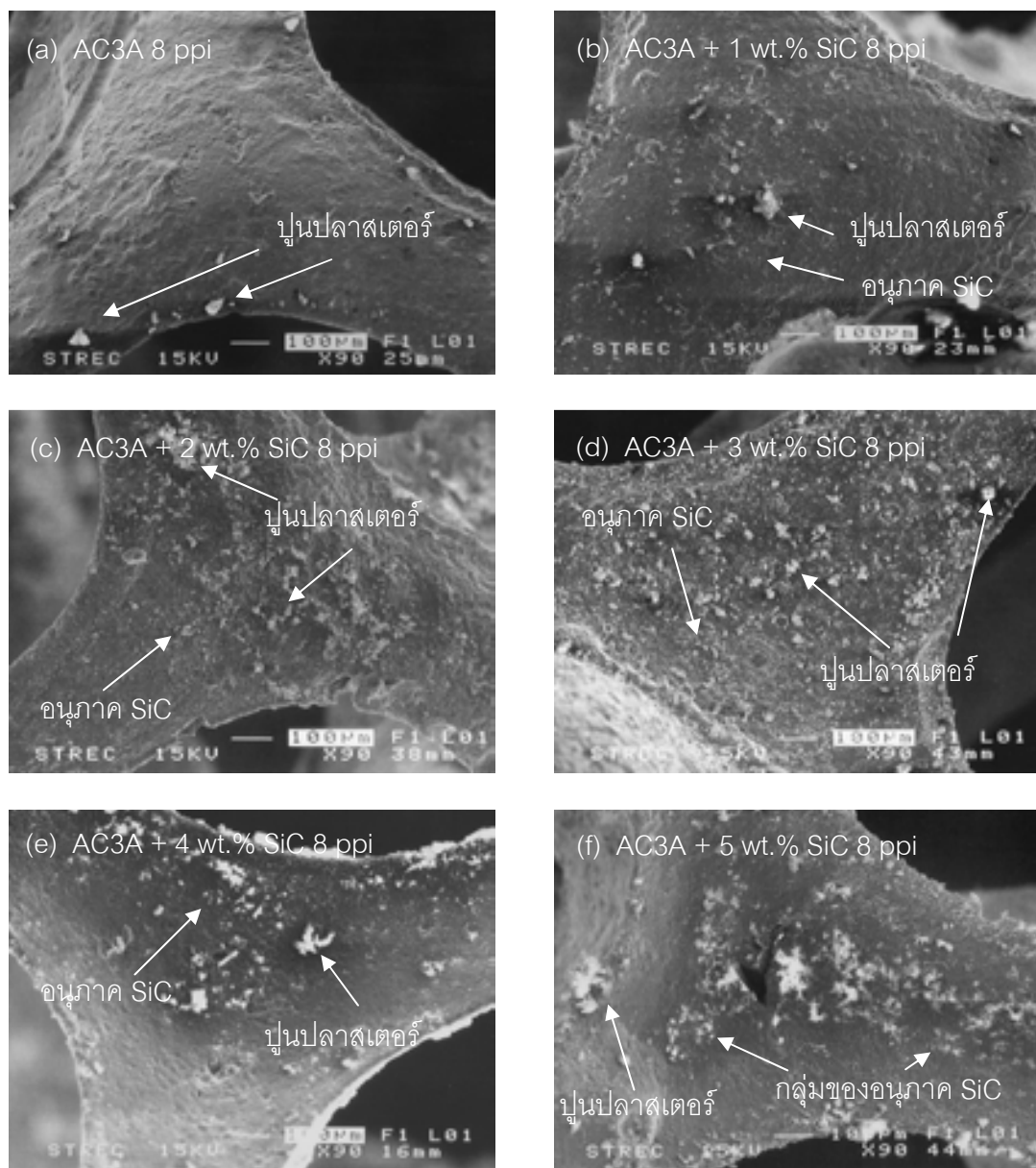
ภาพที่ 4.3 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ (a) Pure Al 8 ppi (b) Al + 1 wt.% SiC 8 ppi
(c) Al + 2 wt.% SiC 8 ppi (d) Al + 3 wt.% SiC 8 ppi (e) Al + 4 wt.% SiC 8 ppi
(f) Al + 5 wt.% SiC 8 ppi



ภาพที่ 4.4 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ (a) AC3A 20 ppi (b) AC3A + 1 wt.% SiC 20 ppi (c) AC3A + 2 wt.% SiC 20 ppi (d) AC3A + 3 wt.% SiC 20 ppi (e) AC3A + 4 wt.% SiC 20 ppi (f) AC3A + 5 wt.% SiC 20 ppi



ภาพที่ 4.5 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ (a) AC3A 12 ppi (b) AC3A + 1 wt.% SiC 12 ppi (c) AC3A + 2 wt.% SiC 12 ppi (d) AC3A + 3 wt.% SiC 12 ppi (e) AC3A + 4 wt.% SiC 12 ppi (f) AC3A + 5 wt.% SiC 12 ppi



ภาพที่ 4.6 พื้นผิวบริเวณผนังโพรงอากาศของ (a) AC3A 8 ppi (b) AC3A + 1 wt.% SiC 8 ppi (c) AC3A + 2 wt.% SiC 8 ppi (d) AC3A + 3 wt.% SiC 8 ppi (e) AC3A + 4 wt.% SiC 8 ppi (f) AC3A + 5 wt.% SiC 8 ppi

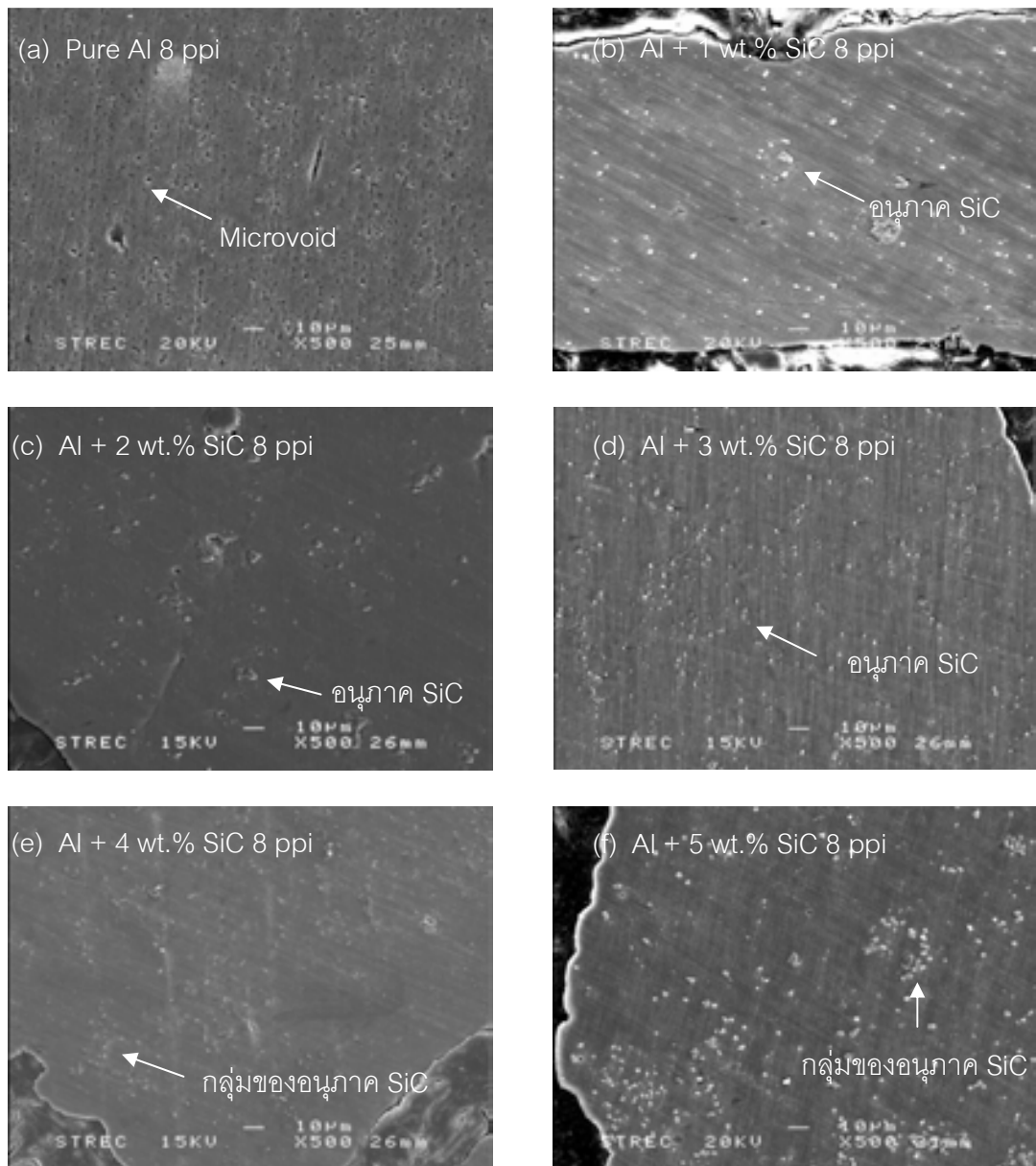
4.3 โครงสร้างจุลภาคของโพลีอะลูมิเนียม (Microstructure)

ภาพที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของโพลี Pure Al ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi ภาพที่ 4.7 (a) ซึ่งเป็นโพลี Pure Al มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microvoids) เกิดจากการหดตัวเนื่องจากการหล่อ (Shrinkage) และอาจเกิดจากแก๊สที่อยู่ภายในอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลว ภาพที่ 4.7 (b-f) จะพบ อนุภาค SiC ฝังตัวอยู่ การกระจายตัวของอนุภาค SiC ค่อนข้างดี แต่ที่สัดส่วนอนุภาค SiC 4 และ 5 wt.% ดังภาพที่ 4.7 (e และ f) จะมีอนุภาค SiC บางส่วนที่รวมกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายตัวอยู่

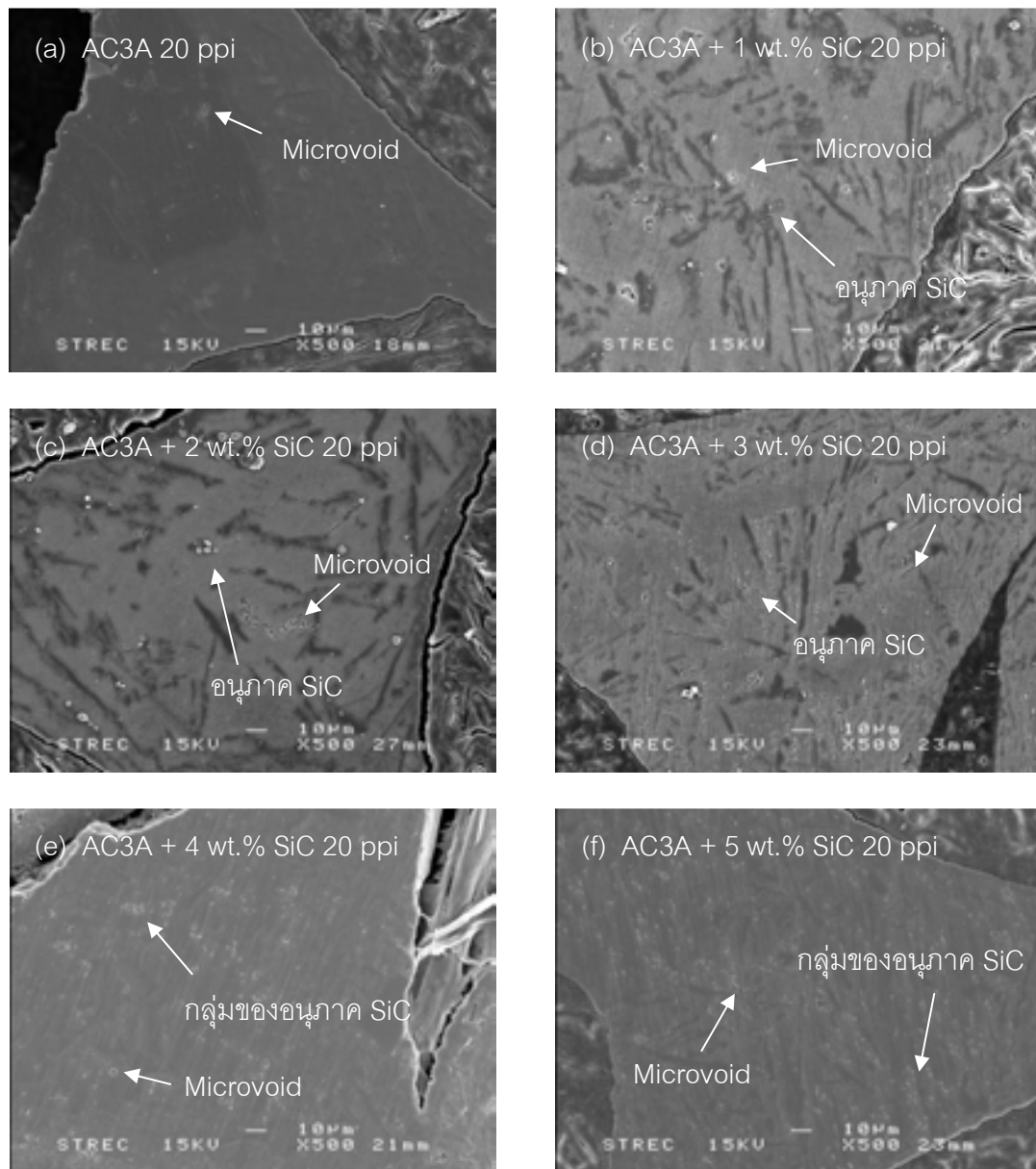
ภาพที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของโพลี AC3A ขนาดโพรงอากาศ 20 ppi มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microvoid) บนเนื้อพื้น เกิดจากการหดตัวเนื่องจากการหล่อ (Shrinkage) และแก๊สที่อยู่ภายในอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลว ภาพที่ 4.8 (b-f) อนุภาค SiC ฝังตัวและมีการกระจายตัวที่ดีบนเนื้อพื้น แต่ที่สัดส่วนอนุภาค SiC 4 และ 5 wt.% ดังภาพที่ 4.8 (e และ f) จะมีอนุภาค SiC บางส่วนที่รวมกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายตัวอยู่

ภาพที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของโพลี AC3A ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi ซึ่งโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของโพลีชนิดนี้ ไม่มีรูพรุนขนาดเล็กบนเนื้อพื้น การกระจายตัวของอนุภาค SiC ดี ยกเว้นที่สัดส่วน 1 wt.% SiC ดังภาพที่ 4.9 (b) อนุภาคจะกระจายตัวค่อนข้างขอบของภาคตัดขวางก้านโพรงอากาศ ส่วนสัดส่วนอนุภาค SiC 4 และ 5 wt.% ดังภาพที่ 4.8 (e และ f) จะมีอนุภาค SiC บางส่วนที่รวมกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายตัวอยู่

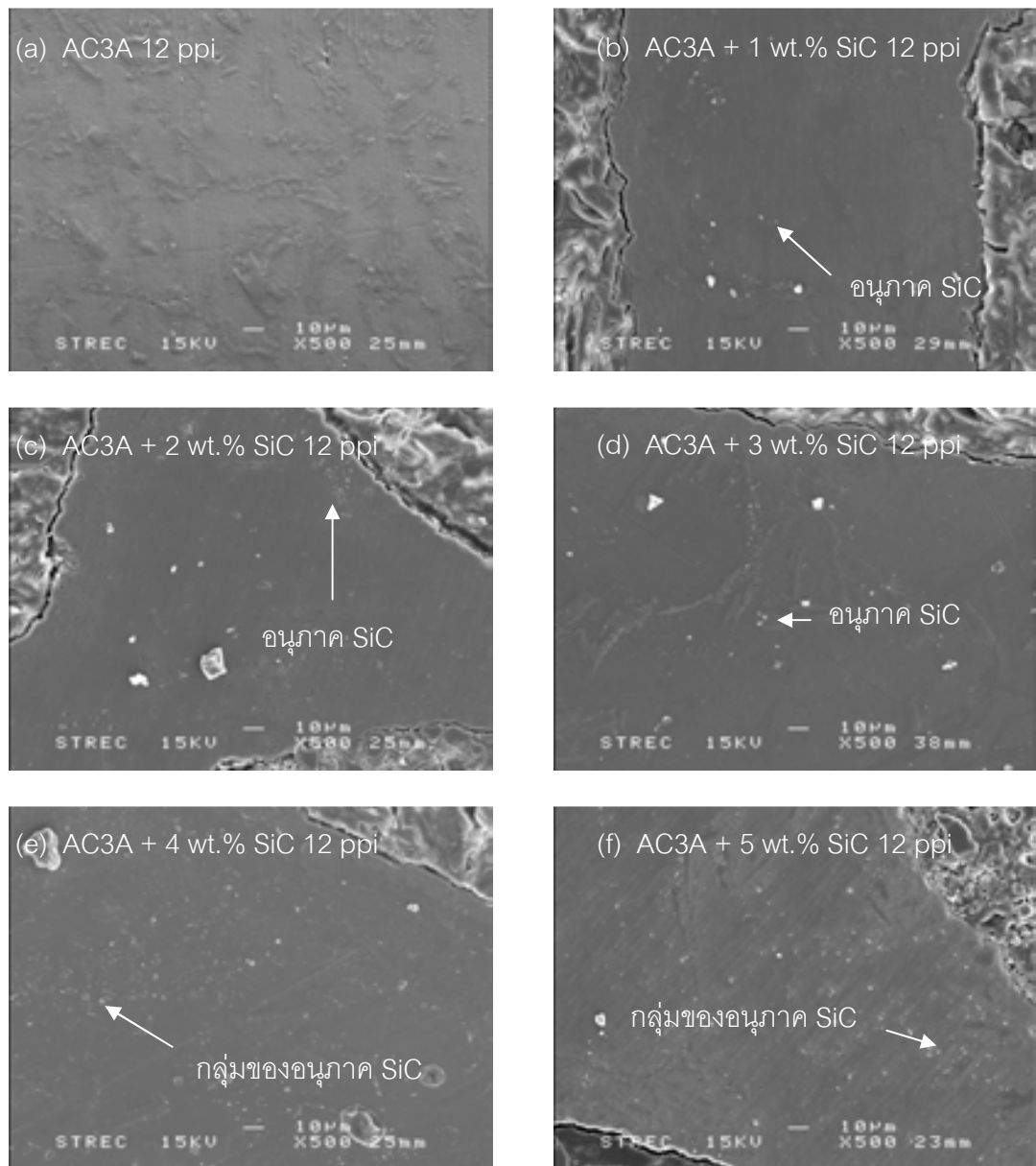
ภาพที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของโพลี AC3A ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi มีรูพรุนขนาดเล็กบนเนื้อพื้น เกิดจากการหดตัวเนื่องจากการหล่อ (Shrinkage) และแก๊สที่อยู่ภายในอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลว เช่นเดียวกับโพลี Pure Al และ AC3A ขนาดโพรงอากาศ 20 ppi ภาพที่ 4.10 (b-f) อนุภาค SiC ฝังตัวและมีการกระจายตัวที่ดีบนเนื้อพื้น แต่ที่สัดส่วนอนุภาค SiC 4 และ 5 wt.% ดังภาพที่ 4.10 (e และ f) จะมีอนุภาค SiC บางส่วนที่รวมกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายตัวอยู่



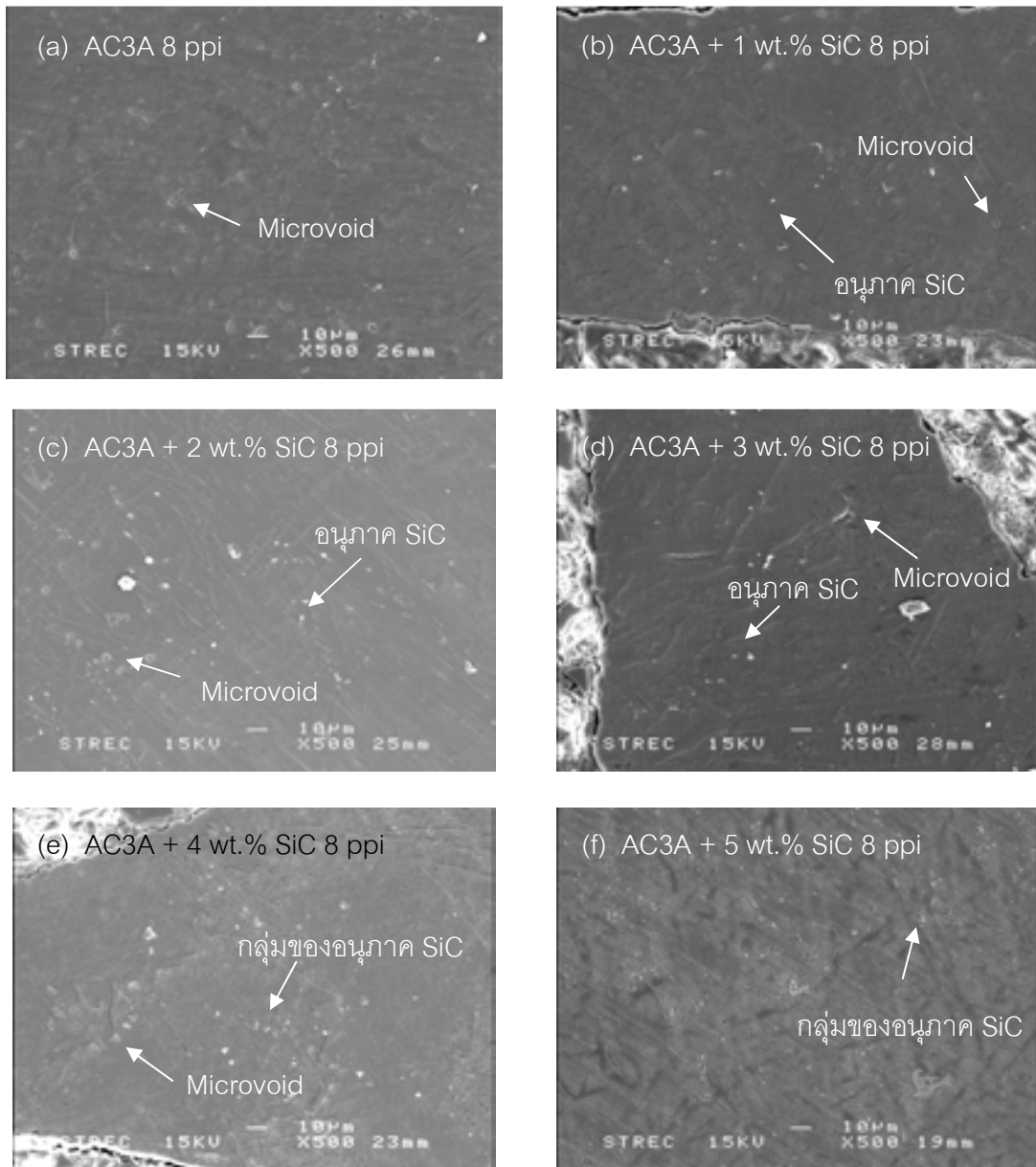
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ (a) Pure Al 8 ppi (b) Al + 1 wt.% SiC 8 ppi (c) Al + 2 wt.% SiC 8 ppi (d) Al + 3 wt.% SiC 8 ppi (e) Al + 4 wt.% SiC 8 ppi (f) Al + 5 wt.% SiC 8 ppi



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ (a) AC3A 20 ppi (b) AC3A + 1 wt.% SiC 20 ppi (c) AC3A + 2 wt.% SiC 20 ppi (d) AC3A + 3 wt.% SiC 20 ppi (e) AC3A + 4 wt.% SiC 20 ppi (f) AC3A + 5 wt.% SiC 20 ppi



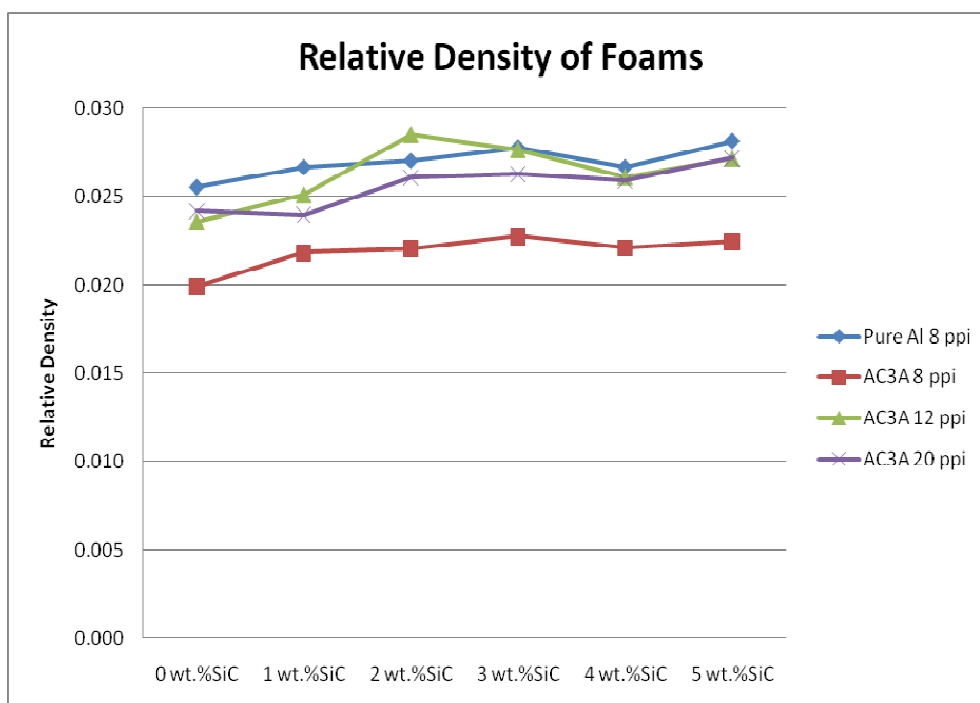
ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ (a) AC3A 12 ppi (b) AC3A + 1 wt.% SiC 12 ppi (c) AC3A + 2 wt.% SiC 12 ppi (d) AC3A + 3 wt.% SiC 12 ppi (e) AC3A + 4 wt.% SiC 12 ppi (f) AC3A + 5 wt.% SiC 12 ppi



ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของ (a) AC3A 8 ppi (b) AC3A + 1 wt.% SiC 8 ppi (c) AC3A + 2 wt.% SiC 8 ppi (d) AC3A + 3 wt.% SiC 8 ppi (e) AC3A + 4 wt.% SiC 8 ppi (f) AC3A + 5 wt.% SiC 8 ppi

4.4 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม (Relative Density of Al Foams)

ความหนาแน่นของชิ้นงานเป็นไปตามภาพที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมทุกๆส่วนผสมจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณอนุภาค SiC ที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟม Pure Al จะมีค่าสูงกว่าโฟม AC3A เล็กน้อย เนื่องจากวัสดุ Pure Al มีความหนาแน่นที่สูงกว่า AC3A เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบโฟม AC3A ด้วยกัน โฟมที่มีขนาด 12 และ 20 ppi จะมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน และโฟมขนาด 8 ppi ซึ่งมีขนาดโพรงอากาศที่ใหญ่กว่า มีความหนาแน่นสัมพัทธ์น้อยกว่า โฟมที่มีขนาด 12 และ 20 ppi



ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

4.5 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม (Compressive Test)

การทดสอบการรับแรงอัดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และ AC3A ที่ส่วนผสม SiC 1-5 wt.% โดยที่ลักษณะการทดสอบแรงอัดเป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.12 ซึ่งแสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมวัสดุผสม AC3A - ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi สังเกตได้ว่าลักษณะการพังตัวของโพรงอากาศจะเริ่มพังจากโพรงอากาศช่วงบนของชิ้นงานและพัง

ลงมาเรื่อยๆจนโพรงอากาศทุกโพรงพังหมด ซึ่งผลการทดสอบแรงอัดจะแสดงความสามารถในการรับแรงอัดในรูปของกราฟความเค้นความเครียดเปรียบเทียบกันโฟมแต่ละชนิดของเนื้อพื้นโลหะ ขนาดของโฟม และปริมาณอนุภาค SiC ที่ผสมลงไปดังแสดงในภาพที่ 4.13 ถึง 4.16

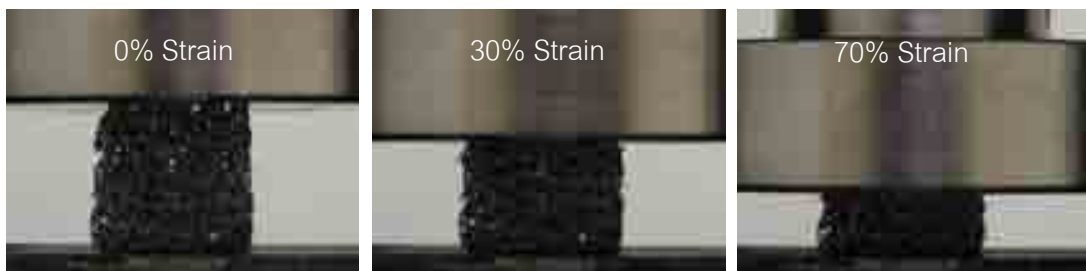
ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น Pure Al ขนาด 8 ppi ลักษณะของกราฟจะค่อนข้างเรียบ ค่าสมบัติทางกลเช่น ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ค่าความเค้นพลาโต (Plateau Stress) และค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) จะค่อยๆสูงขึ้นที่ส่วนผสม SiC ที่มากขึ้น โดยที่ 5 wt.% SiC มีค่าสูงสุด แต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความเครียด ณ ช่วงอัดแน่น จะลดลงตามปริมาณ SiC ที่เพิ่มขึ้น

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 8 ppi ดังภาพที่ 4.14 พบว่าลักษณะของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงตลอดช่วงความเครียด เนื่องจากวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AC3A มีความเปราะสูง และการผสมอนุภาค SiC มีแนวโน้มแสดงผลการทดสอบไปในทางเดียวกันนั่นคือโฟมมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าโฟมที่ไม่ได้ผสม SiC และเมื่อผสมอนุภาค SiC ในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความเค้นพลาโต และค่าการดูดซับพลังงาน ค่อยๆสูงขึ้นตามลำดับ

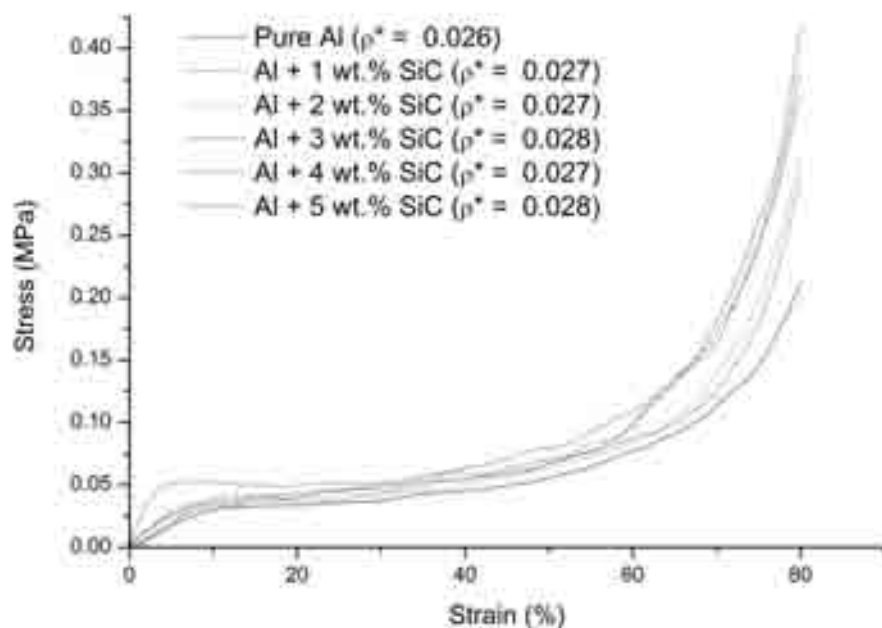
จากภาพที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบแรงอัดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 12 ppi พบว่า กราฟความเค้นความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงตลอดช่วงความเครียด เช่นเดียวกับโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 8 ppi แต่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงความเครียดน้อยกว่า การผสมอนุภาค SiC มีแนวโน้มแสดงผลการทดสอบไปในทางเดียวกันคือโฟมมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าโฟมที่ไม่ได้ผสม SiC และเมื่อผสมอนุภาค SiC ในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความเค้นพลาโต และค่าการดูดซับพลังงาน ค่อยๆสูงขึ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 8 ppi

ผลการทดสอบแรงอัดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 20 ppi ดังภาพที่ 4.15 พบว่ากราฟความเค้นความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงตลอดช่วงความเครียด เช่นเดียวกับโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 8 และ 12 ppi แต่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง

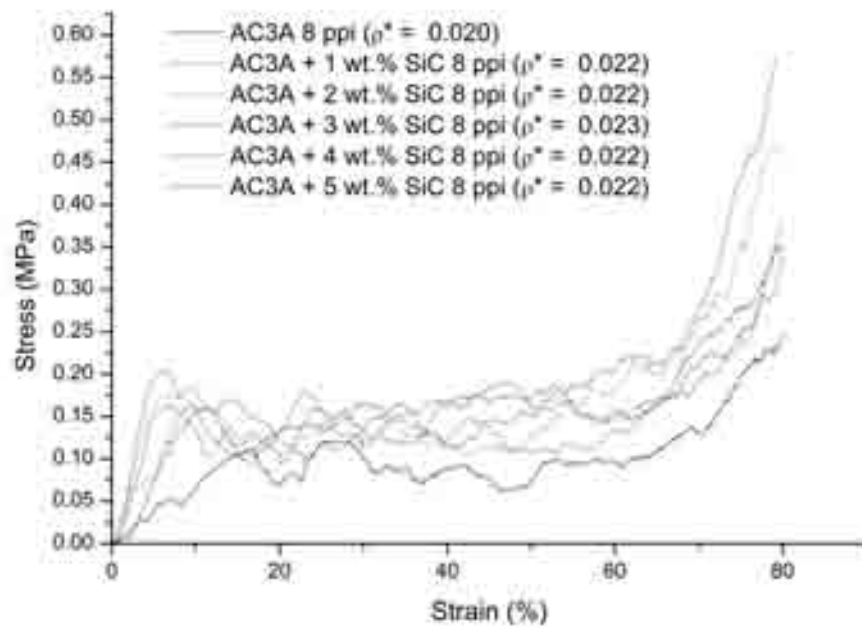
ความเครียดน้อยกว่าสองชนิดแรก การผสมอนุภาค SiC มีแนวโน้มผลการทดสอบไปในทางเดียวกันคือโฟมมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าโฟมที่ไม่ได้ผสม SiC และเมื่อผสมอนุภาค SiC ในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความเค้นพลาโต และค่าการดูดซับพลังงาน ค่อยๆสูงขึ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 8 และ 12 ppi



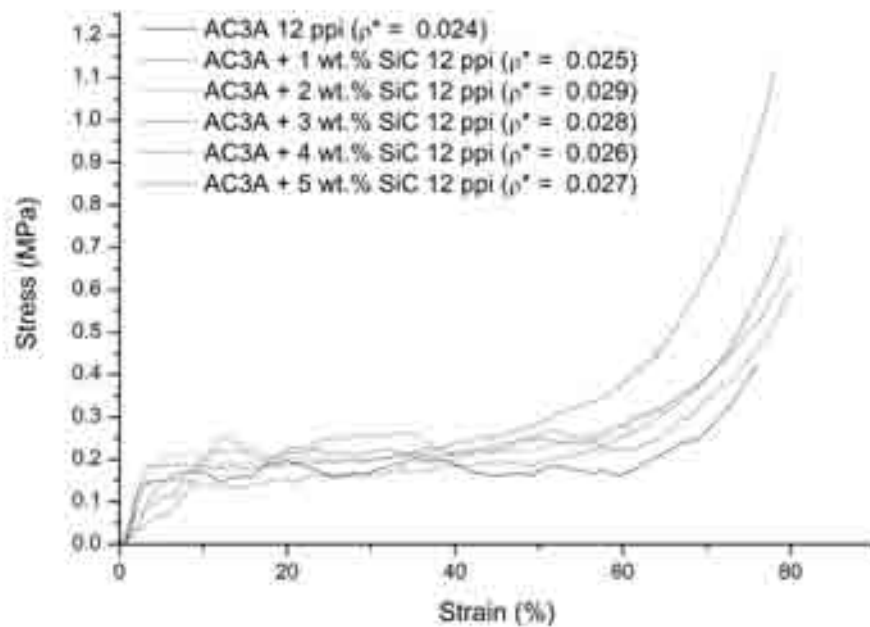
ภาพที่ 4.12 ลักษณะการทดสอบแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีความเครียด 0% 30% และ 70% ของโฟม AC3A 12 ppi



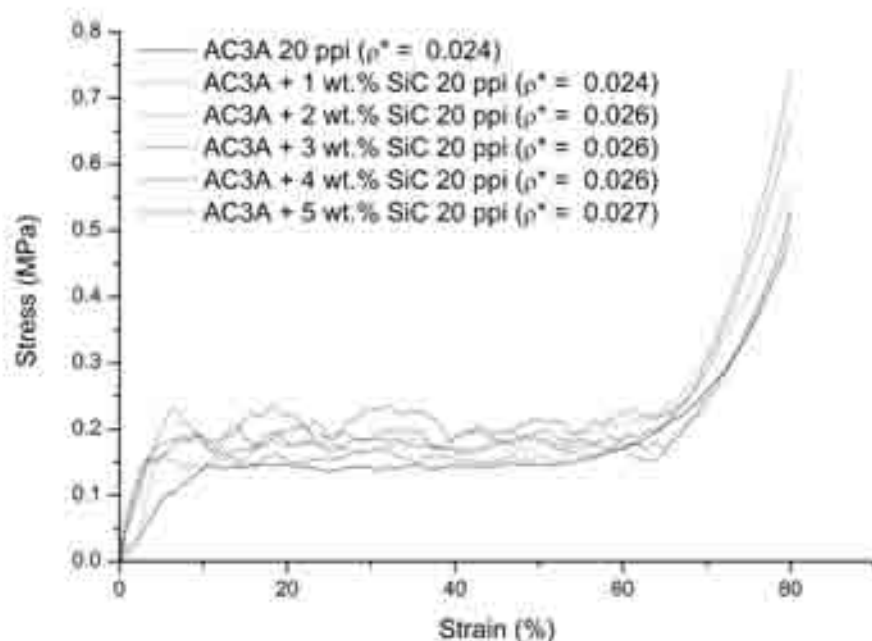
ภาพที่ 4.13 กราฟความเค้นความเครียดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาด 8 ppi



ภาพที่ 4.14 กราฟความเค้นความเครียดของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 8 ppi



ภาพที่ 4.15 กราฟความเค้นความเครียดของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 12 ppi



ภาพที่ 4.16 กราฟความเค้นความเครียดของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาด 20 ppi

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสมบัติทางกลของไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และไฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ที่ส่วนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ 1 – 5 wt.% ที่หาได้จากกราฟความเค้น – ความเครียด ดังนี้ ความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength) ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) และค่าความเค้นในช่วงพลาโต (Plateau Stress)

วัสดุ	ขนาดโพรง อากาศ (ppi)	ส่วนผสม (wt.% SiC)	Yield Strength (MPa)	Energy Absorption ($E_{60\%}$, kJ/m^3)	Plateau Stress (MPa)
Pure Al	8	0	0.034	24.15	0.063
		1	0.039	28.55	0.085
		2	0.04	28.01	0.072

		3	0.042	27.98	0.073
		4	0.043	29.78	0.072
		5	0.052	34	0.094
AC3A	8	0	0.104	48.36	0.123
		1	0.136	68.22	0.171
		2	0.169	80.22	0.218
		3	0.157	80.50	0.194
		4	0.163	88.10	0.190
		5	0.205	87.88	0.239
	12	0	0.150	100.65	0.223
		1	0.152	99.40	0.260
		2	0.180	122.41	0.300
		3	0.188	133.01	0.307
		4	0.193	129.29	0.291
		5	0.221	120.56	0.297
	20	0	0.145	80.73	0.191
		1	0.160	91.57	0.203
		2	0.184	100.74	0.214
		3	0.176	103.19	0.212
		4	0.196	109.16	0.241

		5	0.218	119.80	0.260
--	--	---	-------	--------	-------

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงอัด

จากภาพที่ 4.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงจุดคราก โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาด 8 ppi ที่ผสม อนุภาค SiC ค่าความแข็งแรงจุดครากจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ SiC ที่มากขึ้นตามลำดับ แต่ค่าความแข็งแรงจุดครากจะมีค่าน้อยกว่าโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A มาก แนวโน้มค่าความแข็งแรงจุดครากของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ทุกขนาดโพรงอากาศเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ค่าความแข็งแรงจุดครากเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SiC ที่เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่า ค่า Yield Strength ของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาดโพรงอากาศ 12 และ 20 ppi มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่าโฟม AC3A ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi

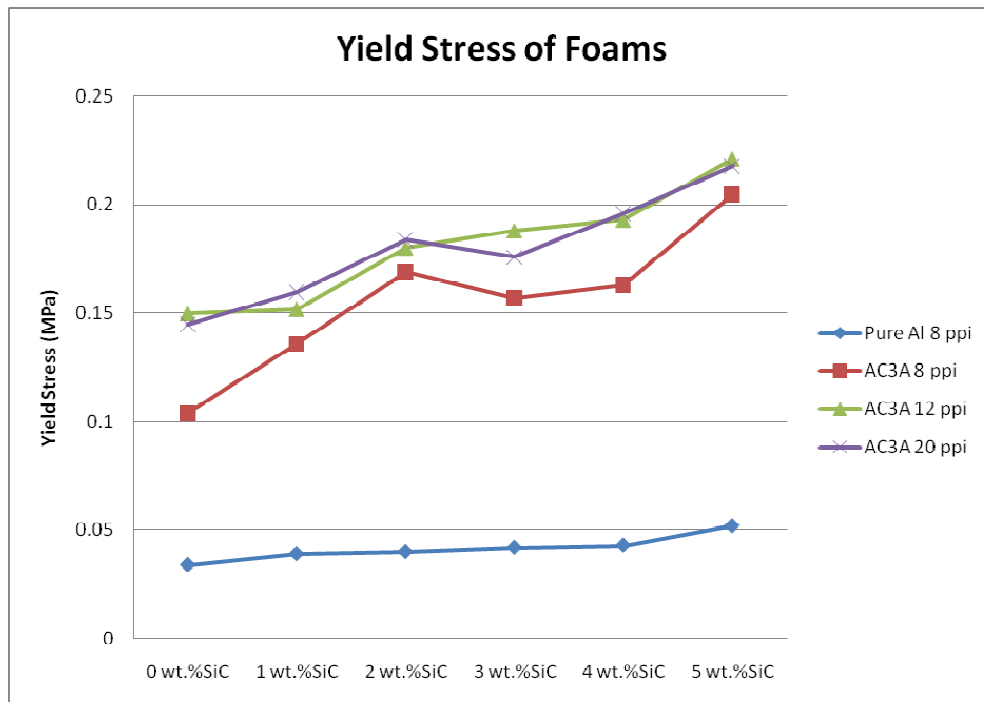
จากภาพที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นในช่วงพลาโต ซึ่งหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความเค้นในช่วงพลาโต โดยที่โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi มีค่าความเค้นพลาโตไม่ต่างกันมากนักถึงแม้จะผสม SiC ก็ตาม แต่โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ทุกขนาดโพรงอากาศ ค่าความเค้นพลาโตเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SiC ที่เพิ่มขึ้น โดยที่โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ที่มีขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีค่าความเค้นพลาโตสูงสุด โดยที่โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาดโพรงอากาศ 20 และ 8 ppi มีค่าความเค้นพลาโตรองลงมาตามลำดับ

จากภาพที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน โดยที่โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi มีค่าการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ SiC ที่เพิ่มขึ้น โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A มีแนวโน้มค่าการดูดซับพลังงานเช่นเดียวกับโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่จะเห็นผลของการผสม SiC ที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ต่างขนาดโพรงอากาศกัน โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ที่มีขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด โดยที่โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาดโพรงอากาศ 20 และ 8 ppi มีค่าการดูดซับพลังงานรองลงมาตามลำดับ

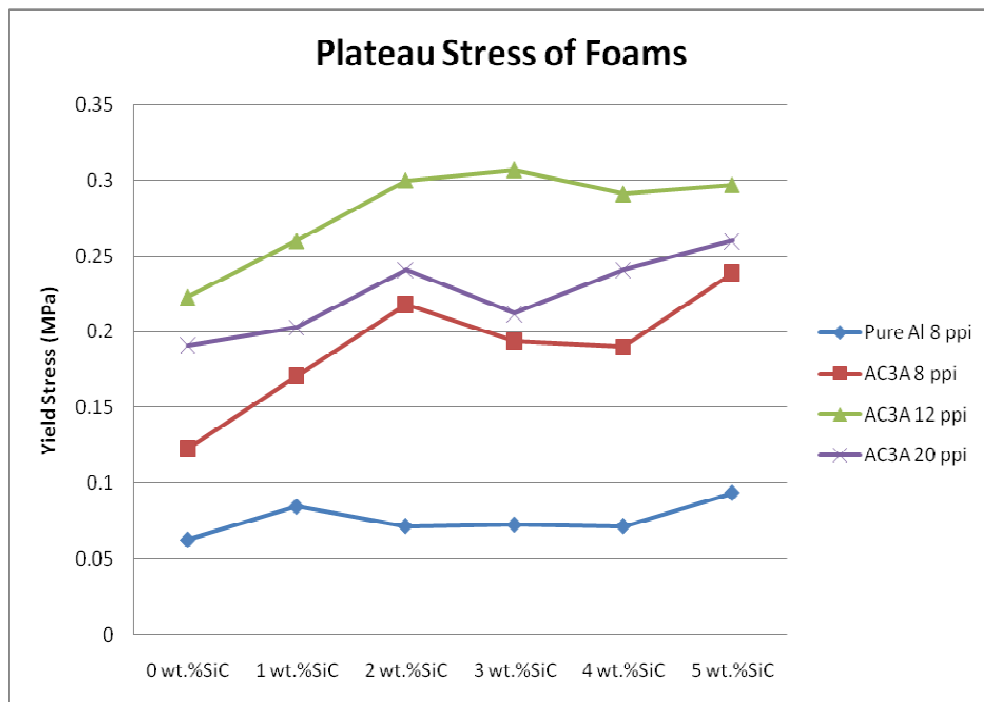
จากภาพที่ 4.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็ง ซึ่งค่าความแข็งของโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ มีค่าความแข็งต่ำกว่าโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้น AC3A เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้น AC3A ที่ขนาดโพรงอากาศต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณการผสม SiC ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับทุกชนิดและขนาดของโพลีเอสเตอร์ผสม

จากภาพที่ 4.21 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงจุดครากจำเพาะ การเพิ่มปริมาณอนุภาค SiC แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงจุดครากคือ เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค SiC ค่าความแข็งแรงจุดครากจำเพาะโพลีเอสเตอร์ผสมทุกชนิดและขนาดโพรงอากาศจะเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงจุดครากจำเพาะของโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าต่ำกว่าโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้น AC3A เมื่อเปรียบเทียบโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้น AC3A ที่ขนาดโพรงอากาศต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรงจุดครากจำเพาะของโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้น AC3A มีค่าใกล้เคียงกัน

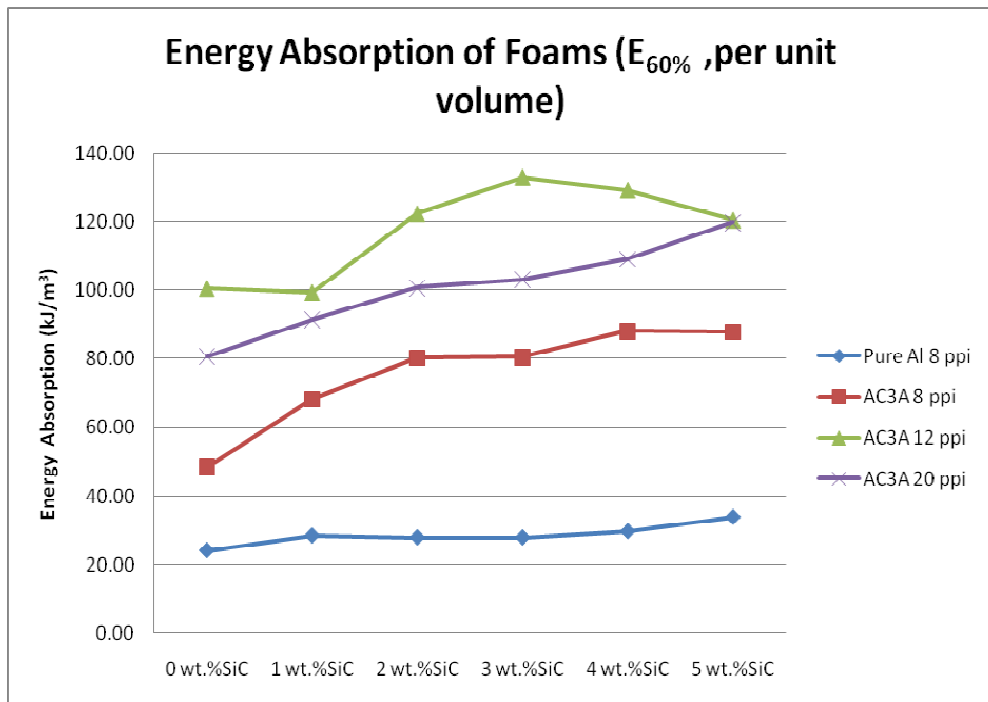
จากภาพที่ 4.22 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นพลาโตจำเพาะ ซึ่งการเพิ่มปริมาณอนุภาค SiC แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความเค้นพลาโตคือ เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค SiC ค่าความเค้นพลาโตจำเพาะโพลีเอสเตอร์ผสมทุกชนิดและขนาดโพรงอากาศจะเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นพลาโตจำเพาะของโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าต่ำกว่าโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้น AC3A เมื่อเปรียบเทียบโพลีเอสเตอร์ผสมเนื้อพื้น AC3A ที่ขนาดโพรงอากาศต่างๆ พบว่าที่ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีค่าความเค้นพลาโตจำเพาะสูงสุดและที่ขนาดโพรงอากาศ 8 และ 20 ppi มีค่าความเค้นพลาโตจำเพาะไม่ต่างกันมากนัก



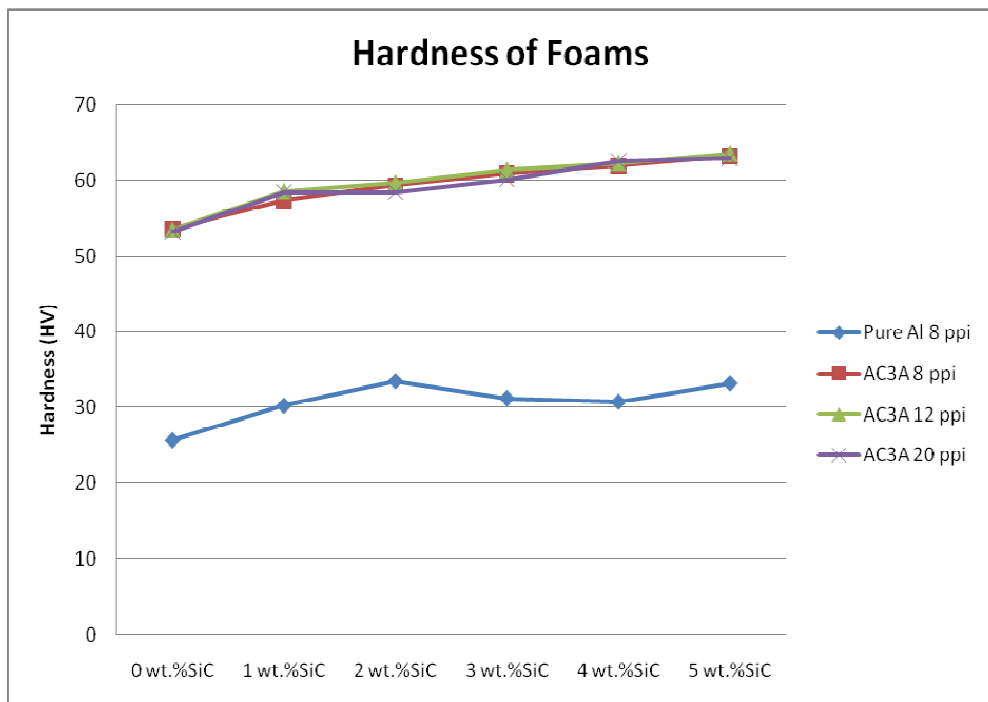
ภาพที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงจุดครากของโฟมอะลูมิเนียม



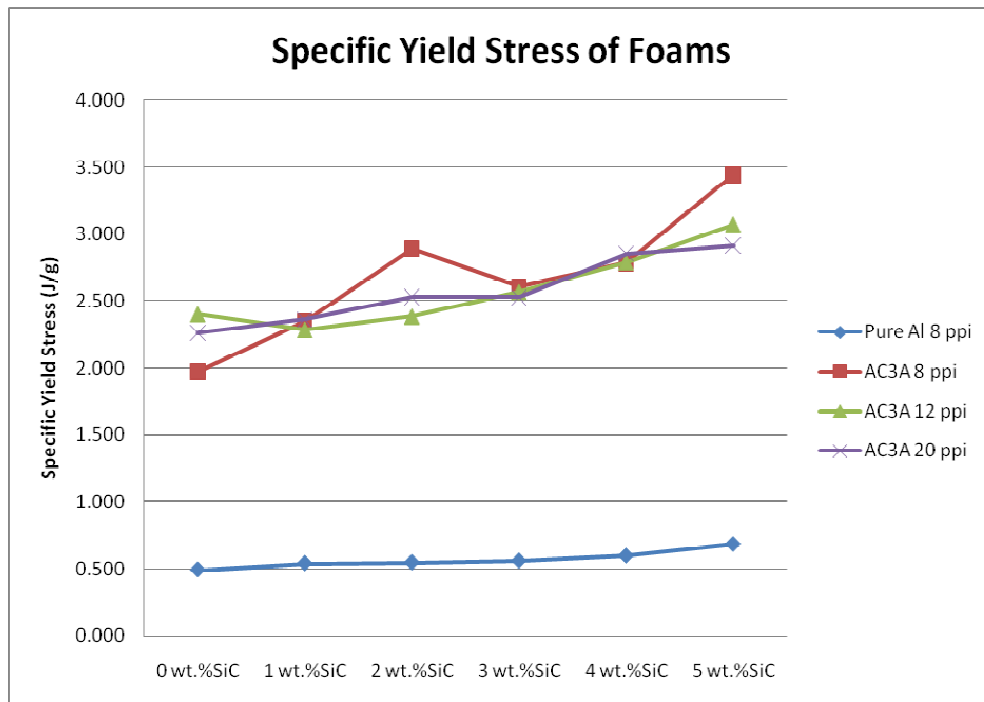
ภาพที่ 4.18 ค่าความเค้นในช่วงพลาโตของโฟมอะลูมิเนียม



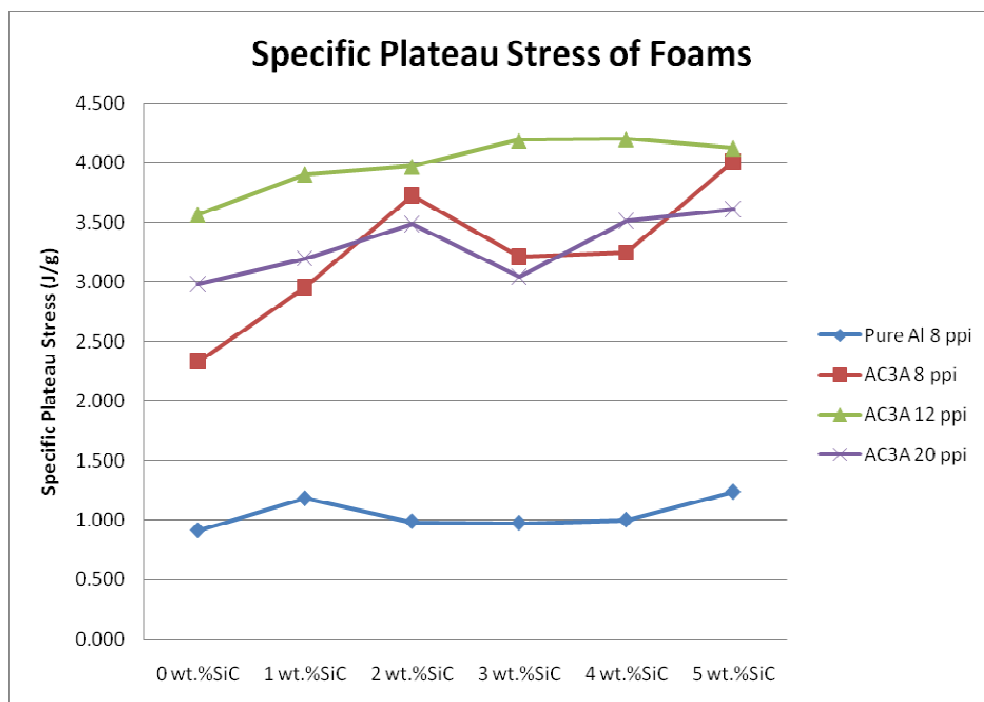
ภาพที่ 4.19 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม



ภาพที่ 4.20 ค่าความแข็งของโฟมอะลูมิเนียม



ภาพที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงจุดครากจำเพาะของโฟมอะลูมิเนียม



ภาพที่ 4.22 ค่าความเค้นพลาโตจำเพาะของโฟมอะลูมิเนียม

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ผลของวัสดุเนื้อพื้น (Matrix)

5.1.1 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อกระบวนการผลิต

ในการผลิตโฟมด้วยวิธีการหล่อแทรกซึ่มด้วยแรงดัน ปัจจัยหลักในการผลิตในการหล่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์คือความหนืดของน้ำโลหะหลอมเหลว [35] วัสดุเนื้อพื้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองชนิดคือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Al) และอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A ณ อุณหภูมิใดๆที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ อะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A มีความหนืดต่ำกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เนื่องจากธาตุผสมหลักในอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A คือซิลิคอน (Si) ซึ่งธาตุผสมซิลิคอนส่งผลให้ความหนืดของอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A ลดลง [28] การที่จะหล่อให้เต็มแบบได้ดีนั้นอุณหภูมิหล่อเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลเกี่ยวข้องกับความหนืด จากสมการของ Arrhenius (สมการที่ 2.3) ค่าความหนืดจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง เพราะฉะนั้นอุณหภูมิหล่อที่สูง การหล่อให้เต็มแบบก็จะทำได้ดี ทั้งนี้อุณหภูมิของแบบหล่อมีผลต่อกระบวนการหล่อด้วย ซึ่งการให้ความร้อนแก่แบบหล่อทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมสูญเสียความร้อนช้าและยังคงรักษาความสามารถในการไหลไว้ได้ [35] แบบหล่อที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ทนความร้อนได้สูงสุด 650°C โดยไม่สูญเสียความแข็งแรง โดยที่ความร้อนที่ให้แบบหล่อในการทดลองจะอยู่ที่ 650°C เพราะฉะนั้นอุณหภูมิแบบหล่อไม่มีผลต่อการทดลองที่ได้

5.1.2 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ AC3A นั้น เมื่อผลิตเป็นชิ้นงานโฟมแล้ว ลักษณะของโครงสร้างมหภาคไม่ต่างกัน เต็มเต็มแบบได้ดีพอๆกัน แต่สำหรับโครงสร้างจุลภาคนั้น มีจุดแตกต่างกันคือโครงสร้างของเนื้อพื้น ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดข้างต้นมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีปริมาณของ Al 99.7 wt.% โครงสร้างจึงเป็นผิวเรียบไม่มีเฟสอื่นๆปนอยู่ ส่วน AC3A มีปริมาณ Si สูง โครงสร้างจุลภาคจึงมีโครงสร้างแบบเดนไดรต์ของ Al-Si มีโครงสร้างยูเทกติกของ Si ซึ่งมีลักษณะคล้ายเข็ม (Acicular)

5.1.3 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโม่คือสัดส่วนของค่าความหนาแน่นของโม่กับค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ผลิตโม่ วัสดุเนื้อพื้นที่ใช้ผลิตชิ้นงานโม่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ เนื่องจากอะลูมิเนียมบริสุทท์ และ AC3A มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 2.7 g/cm^3 และ 2.65 g/cm^3 ตามลำดับ [26]

5.1.4 ผลของวัสดุเนื้อพื้นต่อสมบัติทางกล

ปัจจัยหลักของสมบัติทางกลของโม่อะลูมิเนียมผสม-ซิลิคอนคาร์ไบด์ คือวัสดุเนื้อพื้น [20] ถ้าวัสดุเนื้อพื้นแข็งแรง โม่ก็จะแข็งแรงตาม วัสดุเนื้อพื้นที่ใช้ผลิตโม่คือ อะลูมิเนียมบริสุทท์ และ AC3A ซึ่งอะลูมิเนียมบริสุทท์มีค่าความแข็งแรงจุดครากโดยทั่วไปประมาณ 90 MPa AC3A มีค่าความแข็งแรงจุดครากมากกว่า 190 MPa [26] AC3A มีค่าความแข็งแรงมากกว่าอะลูมิเนียมบริสุทท์ค่อนข้างมาก เนื่องจากธาตุผสม Si ที่เติมลงไป 12 wt.% ใน AC3A สรุปได้ว่า โม่วัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A มีความแข็งแรงสูงกว่าโม่วัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทท์ ทั้งยังมีคุณสมบัติค่าความเค้นพลาโตและการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าด้วย แต่ธาตุผสม Si ใน AC3A ส่งผลให้ความเหนียวลดลงมาก โม่จึงมีความเปราะมากขึ้นทำให้กราฟความเค้น – ความเครียดของโม่วัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A มีลักษณะไม่เรียบเมื่อได้รับความเค้น แสดงในภาพที่ 4.14 – 4.16 เมื่อเปรียบเทียบกับโม่วัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทท์แสดงในภาพที่ 4.13

จากภาพที่ 4.20 ความแข็ง (Hardness) ของ AC3A มีค่าสูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทท์ เนื่องจากธาตุผสม Si ใน AC3A ทำให้เกิดโครงสร้างแบบเดนไดรท์ที่มีโครงสร้างยูเทคติกของ Si ซึ่งมีลักษณะคล้ายเข็ม ซึ่งโครงสร้างนี้ส่งผลให้ความแข็งสูงขึ้น

5.2 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide, SiC)

5.2.1 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อกระบวนการผลิต

อนุภาค SiC ที่เติมลงไปในอะลูมิเนียมทั้งสองชนิด จะส่งผลต่อความหนืดซึ่งเป็นปัจจัยหลักในกระบวนการผลิต [35] ซึ่งการเติมอนุภาค SiC จะส่งผลให้ความหนืดของน้ำอะลูมิเนียมสูงขึ้นเนื่องจากอนุภาค SiC จะไปขัดขวางการไหลของน้ำอะลูมิเนียมขณะหล่อ [20] ซึ่ง

ความหนืดจะสูงขึ้นตามปริมาณอนุภาค SiC ที่เติมลงไปมากขึ้นเนื่องจากสัดส่วนของแข็งซึ่งก็คืออนุภาค SiC และของเหลวมากขึ้น (Solid Content) [35] อนุภาค SiC ยังส่งผลถึงจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมด้วย เนื่องจากการเติมอนุภาค SiC ในขณะหลอมมีซิลิคอนบางส่วนจากอนุภาค SiC ไปผสมกับน้ำอะลูมิเนียม ส่งผลให้ปริมาณซิลิคอน (Silicon Content) ในอะลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากน้ำโลหะอะลูมิเนียม เมื่อสัมผัสกับอนุภาค SiC จะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นดังสมการ 5.2



ปฏิกิริยาเคมีเริ่มเกิดจากการแยกตัวของธาตุ Si และ C ต่อมาเกิดการแพร่ของธาตุ C เข้าไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียม สุดท้ายการละลายของ C ในอะลูมิเนียมทำให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic) Al_4C_3 และ Si ที่แยกตัวออกมา [21] ปริมาณ Si ที่สูงในอะลูมิเนียมผสมมีส่วนสำคัญในการป้องกันปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ 5.2 เกิดหรือเกิดได้น้อย โดยที่อะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A ที่ใช้มี Si 12 wt.% หลอมที่อุณหภูมิ 1200°C [37] ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวแทบจะไม่เกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถตรวจพบชั้นสารประกอบกึ่งโลหะ Al_4C_3 ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อเนื้อพื้กับอนุภาค SiC ได้ เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าการเติมอนุภาค SiC ในปริมาณที่สูงส่งผลให้ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมสูงขึ้นเหตุผลหลักมาจากสัดส่วนระหว่างของแข็งซึ่งก็คืออนุภาค SiC และของเหลวคือน้ำโลหะอะลูมิเนียมมีสัดส่วนของของแข็งที่สูงขึ้น การไหลจึงยากขึ้น การหล่อโพนให้เต็มแบบทำได้ยากขึ้น

5.2.2 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

การกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงในโลหะนั้นมีความสามารถในการเปียกของน้ำโลหะกับอนุภาคเป็นปัจจัยหลักในกระบวนการผลิตโดยการหล่อ ถ้าความสามารถในการเปียกของน้ำโลหะกับอนุภาคไม่ดี อนุภาคก็จะถูกผลักออกไปที่ผิวสัมผัสของน้ำโลหะ การกระจายตัวของอนุภาคจึงไม่ทั่วทั้งชิ้นงาน [22] อนุภาค SiC ที่พบบริเวณผิวก้านโพรงอากาศและภาคตัดขวางของโพนทั้งสองชนิดนั้น มีการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากน้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความสามารถในการ

เป็ยก SiC ในระดับหนึ่ง [22] เมื่อวัสดุอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นซึ่งมีการกระจายตัวของอนุภาค SiC ที่ติดอยู่แล้ว นำไปหล่อขึ้นงานโม่ที่อุณหภูมิ 1100°C เมื่อวัสดุอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนคาร์ไบด์เกิดการหลอมเหลว เนื่องจากอุณหภูมิหล่อสูงถึง 1100°C น้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความสามารถในการเป็ยก SiC ที่ดีขึ้น [27] จึงทำให้อนุภาค SiC ในวัสดุอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ที่กำลังหลอมถูกผลักไปยังผิวสัมผัสผิวน้อยลง ส่งผลให้อนุภาค SiC กระจายทั่วในเนื้อขึ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.7 – 4.10 การกระจายตัวของอนุภาค SiC ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ AC3A มีความแตกต่างกันตรงที่การกระจายตัวของ SiC ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สามารถกระจายได้ทุกบริเวณของเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ส่วน AC3A มีโครงสร้างแบบเดนไดรต์ของไพรมารี K หรือ α - Al (Primary K or α - Al) โดยมีโครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กของเฟส α - Al และซิลิคอน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปเข็มเล็ก ๆ (Acicular) แทรกสลับอยู่ในเฟส α - Al [38] เมื่อเกิดการเย็นตัวอนุภาค SiC จะถูกผลักออกโดยโครงสร้างเดนไดรต์ของเฟส α - Al อนุภาค SiC จึงกระจายตัวอยู่ในบริเวณระหว่างโครงสร้างเดนไดรต์ของเฟสไพรมารี K หรือ α - Al (Interdendritic Region) [25]

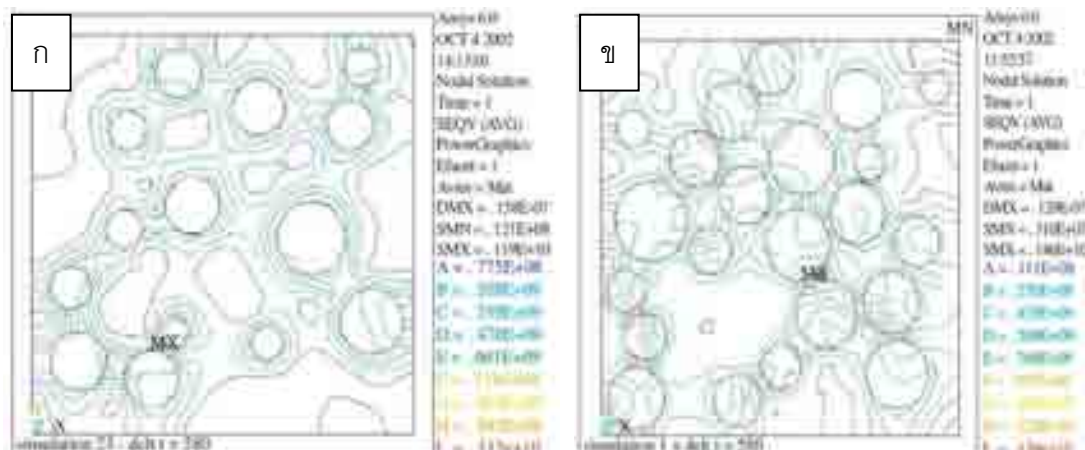
5.2.3 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโม่คือสัดส่วนของค่าความหนาแน่นของโม่กับค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ผลิตโม่ เมื่อเติมอนุภาค SiC ย่อมส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ผลิตโม่เปลี่ยนไป จากกฎการผสมตามสมการที่ 2.4 [11] ค่าความหนาแน่นจะแปรผันตามสัดส่วนปริมาตรของอนุภาค SiC ซึ่งปริมาณอนุภาค SiC ที่เติมลงไปสูงขึ้น ปริมาตรย้อมสูงขึ้นตาม ความหนาแน่นของอนุภาค SiC มีค่า 3.186 g/cm³ [26] ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ AC3A จึงสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณ SiC เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุผสมทั้งสองเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ทำให้ค่าความหนาแน่นของโม่อะลูมิเนียมผสม-ซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มสูงขึ้นด้วย ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโม่ซึ่งคือสัดส่วนของค่าความหนาแน่นของโม่กับค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ผลิตโม่ จึงมีค่าไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 4.11

5.2.4 ผลของวัสดุเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อสมบัติทางกล

จากภาพที่ 2.14 แสดงถึงการเสริมแรงด้วยอนุภาค SiC ส่งผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้นเป็นที่รู้กันดีว่าอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย SiC ให้ความแข็งแรงที่สูงขึ้น แต่จะทำให้ความเหนียวลดลง และยังเป็นผลให้เข้าสู่ช่วงการอัดแน่นในกราฟความเค้น – ความเครียดในช่วงความเครียดที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคที่เติมลงไป [20, 23] แสดงในภาพที่ 4.12 – 4.15 ซึ่งกราฟจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ SiC การเปลี่ยนแปลงของความเค้นอย่างรุนแรงในกราฟช่วงบริเวณที่ราบ (Plateau Region) ของโฟมวัสดุผสม AC3A – ซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นเกิดจากก้านโครงอากาศของโฟมได้รับความเค้นจนถึงจุดที่ทำให้ก้านโครงอากาศพังตัว เนื่องจากก้านโครงอากาศมีคุณสมบัติที่เปราะส่งผลให้ความเค้นลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากเกิดการพังตัวเศษก้านโครงอากาศที่หักก็จะถูกบีบอัดพร้อมกับการพังตัวของก้านโครงอากาศอันอื่น เหตุการณ์นี้จะเกิดเป็นวงจรไปเรื่อยๆ [30] ดังแสดงในภาพที่ 4.14 – 4.16

การที่โฟมอะลูมิเนียมผสม-ซิลิคอนคาร์ไบด์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค SiC นั้น เนื่องจากมีอนุภาค SiC กระจายอยู่ในเนื้อพื้นและบริเวณผิวก้านโครงอากาศ การกระจายตัวที่ดีของอนุภาค SiC เป็นผลมาจากคุณสมบัติการเปียกที่ดีของอนุภาค SiC ในน้ำโลหะอะลูมิเนียม [22] เมื่อโฟมอะลูมิเนียมผสม-ซิลิคอนคาร์ไบด์มีการรับแรงกระทำ ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในโฟมบริเวณก้านโครงอากาศและ Plateau Boarder โดยส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านไปบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเนื้อพื้นกับอนุภาค SiC ซึ่งบริเวณนี้จะสามารถรับความเค้นได้สูงกว่าบริเวณอื่น [24] เมื่อปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้นความเค้นที่เกิดขึ้นก็จะกระจายไปยังผิวสัมผัสระหว่างเนื้อพื้นกับอนุภาค SiC ได้มากขึ้น แสดงด้วยภาพจำลองในภาพที่ 5.1 โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาตรของวัสดุเสริมแรงดังแสดงในภาพที่ 2.15 [11] เพราะฉะนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค SiC ทำให้ค่าคุณสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงจุดครากและความเค้นพลาสติก สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค SiC แสดงในภาพที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งคุณสมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับสมการของ Gibson และ Ashby ดังสมการที่ 2.9 [15] โดยที่ค่าความแข็งแรงจุดครากจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มอนุภาค SiC ส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมสูงขึ้นดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2.3



ภาพที่ 5.1 แบบจำลองการรับแรงของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในเนื้ออะลูมิเนียม (ก) อะลูมิเนียมผสมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 17.9 vol.% (ข) อะลูมิเนียมผสมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 35.2 vol.% [24]

การเติมอนุภาค SiC ในปริมาณที่สูงขึ้น การฝังตัวของ SiC ในเนื้อโพลีเมอร์สูงขึ้น จากเหตุผลที่ได้กล่าวไปข้างต้น ส่งผลให้กราฟความเค้น-ความเครียดมีระดับที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงขึ้น แสดงในภาพที่ 4.19

5.3 ผลของขนาดโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียม

5.3.1 ผลของขนาดโพรงอากาศของโพลีต่อกระบวนการผลิต

โพลีโพลีเอธิลีนที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิตมี 3 ขนาดคือ 8, 12 และ 20 ppi ซึ่งค่า ppi (pore per inch) บอกถึงจำนวนโพรงอากาศในความยาว 1 นิ้ว จากตารางที่ 4.2 โพลีโพลีเอธิลีนขนาด 8 ppi มีขนาดของก้านโพรงอากาศและ Plateau boarder ใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ 12 และ 20 ppi ตามลำดับ จากการศึกษาของ A. Mortensen และคณะ [7] ซึ่งศึกษากระบวนการผลิตด้วยวิธี Replication Process โดยใช้แม่พิมพ์เกล็ดดังแสดงในภาพที่ 2.5 ขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดเกล็ดของแม่พิมพ์เกล็ดซึ่งขึ้นกับความหนาแน่นของต้นแบบ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแทรกซึมของน้ำโลหะ สัมพันธ์กับแรงดันที่ใช้ในการแทรกซึม ซึ่งจะมีแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Pressure) ค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการแทรกซึมของน้ำโลหะในช่องว่างระหว่างเม็ดเกล็ดในสัดส่วนที่มากดังแสดงในภาพที่ 2.7 เพราะฉะนั้นที่ขนาดช่องว่างต่างกัน แรงดันต่ำสุดที่ใช้ในการแทรกซึมให้เต็มช่องว่างจึงต่างกัน ถ้าขนาดช่องว่างมีขนาดเล็ก แรงดันที่ใช้ในการแทรกซึมจึงต้องสูงกว่า

แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนค่อนข้างมาก จากภาพที่ 4.2 โฟมที่ผลิตได้มีลักษณะที่ดี ค่อนข้างเหมือนโฟมโพลียูรีเทนต้นแบบ อาจเป็นไปได้ว่าแรงดันที่ให้กับน้ำโลหะอะลูมิเนียมในกระบวนการหล่อซึ่งมีค่า 1.2 bar รวมกับความดันสุญญากาศอีก 1 bar ทั้งหมดเป็น 2.2 bar ซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนค่อนข้างมากสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A ส่งผลให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเต็มเต็มก้านโพรงอากาศและ Plateau boarder ได้ดีตั้งแต่โพรงอากาศขนาดเล็กที่สุดคือ 20 ppi ไปจนถึงขนาด 12 และ 8 ppi แต่กระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ น้ำโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความสามารถในการเปียกกับแม่พิมพ์ซึ่งผลิตจากเซรามิกที่ต่ำกว่าอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A ซึ่งมีธาตุผสมหลักคือ Si [20] ส่งผลให้มีค่าความดันขีดเริ่มสูงกว่าการผลิตโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A การผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่สามารถผลิตโฟมขนาดโพรงอากาศ 12 และ 20 ppi ให้เต็มแบบสมบูรณ์ได้ เป็นเพราะความดันที่ใช้ทั้งหมด 2.2 bar มากกว่าความดันขีดเริ่มไม่มากพอ ซึ่งพิจารณาจากภาพที่ 4.2 [7] เป็นตัวอย่างได้ แต่ความดันที่ใช้ 2.2 bar มากกว่าความดันขีดเริ่มของการผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi มากพอ จึงสามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi ได้เต็มแบบ

5.3.2 ผลของขนาดโพรงอากาศของโฟมต่อโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

ขนาดของโพรงอากาศมีผลต่อโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม เนื่องจากขนาดโพรงอากาศที่ใหญ่ ขนาดของก้านโพรงอากาศและ Plateau boarder ก็จะใหญ่ตาม ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3.1 แสดงในภาพที่ 4.3 – 4.6 แต่ขนาดของโพรงอากาศไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของโฟม ลักษณะเนื้อพื้นและการกระจายตัวของ SiC ไม่แตกต่างกันในแต่ละขนาดของโพรงอากาศ

5.3.3 ผลของขนาดโพรงอากาศของโฟมต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

โฟมวัสดุผสม AC3A – ซิลิคอนคาร์ไบด์โพรงอากาศขนาด 20 12 และ 8 ppi มีขนาดของโพรงอากาศใหญ่ขึ้นตามลำดับ โฟมขนาด 8 ppi มีโพรงอากาศที่ค่อนข้างใหญ่กว่าโฟมขนาด 12 และ 20 ppi อย่างชัดเจน มีปริมาตรโพรงอากาศที่สูงกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นต่ำกว่าโฟมขนาด 12 และ 20 ppi ซึ่งโฟมทั้งสองขนาดนี้มีขนาดโพรงอากาศและก้านโพรงอากาศต่างกันไม่

มาก จากภาพที่ 4.11 โฟมขนาด 12 และ 20 ppi มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน ซึ่งแท้จริงแล้วโฟมขนาด 20 ppi ควรจะสอดคล้องกับความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนดังตารางที่ 4.3 ซึ่งมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่า เป็นไปได้ว่าลักษณะการตัดชิ้นงานโฟมส่งผลต่อปริมาณก้านโครงอากาศในโฟม ถ้าแนวตัดผ่านส่วนที่เป็นโครงอากาศเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เป็นเนื้อโฟมจะลดลงในทางกลับกัน ถ้าแนวตัดผ่านส่วนที่เป็นก้านโครงอากาศเป็นส่วนใหญ่ ปริมาณเนื้อโครงอากาศก็จะมีมากกว่า

5.3.4 ผลของขนาดโครงอากาศของโฟมต่อสมบัติทางกล

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 5.3.3 การที่จะพิจารณาคูณสมบัติทางกลนั้นจะพิจารณาที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.11 เป็นหลัก และการที่จะทดสอบแรงอัดเพื่อให้ได้ผลที่คงที่ ไม่มีผลของขนาดโครงอากาศ (Size Effects) ทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนได้ ขนาดของชิ้นงานโฟมโครงอากาศแบบเปิดต้องมีสัดส่วนของความยาวหน้าตัดของโฟมและเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงอากาศ (L/d) มากกว่าหรือเท่ากับ 8 [31] ซึ่งชิ้นงานโฟมที่ใช้ทดสอบมีขนาด $20 \times 20 \times 20$ mm ขนาดโครงอากาศ 8 ppi เป็นขนาดที่มีจำนวนโครงต่อความยาวน้อยที่สุด เพราะฉะนั้นค่า L/d ที่น้อยที่สุดของชิ้นงานทดสอบทั้งหมดมีค่าประมาณ 8 การทดสอบแรงอัดจึงไม่มี Size effects ทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อน จากการศึกษาของ T.G. Nieh ขนาดของโครงอากาศไม่มีผลต่อความแข็งแรงของโฟมเมื่อโฟมเหล่านั้นเป็นโฟมที่ผลิตจากวัสดุเดียวกันและมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เท่ากัน [39] ซึ่งผลจากภาพที่ 4.21 เป็นการยืนยันที่ดี เพราะฉะนั้นความหนาแน่นสัมพัทธ์นั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อความแข็งแรงของโฟม จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ Gibson และ Ashby ดังสมการที่ 2.9 ความหนาแน่นสัมพัทธ์มีผลโดยตรงกับความแข็งแรงของโฟม โดยที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์จะแปรผันโดยตรงกับความแข็งแรง จึงสรุปได้ว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โฟมมีความแข็งแรงสูงขึ้น นอกจากนั้นความหนาแน่นสัมพัทธ์ยังมีอิทธิพลต่อการดูดซับพลังงานของโฟม ซึ่งการดูดซับพลังงานจะสูงขึ้นเมื่อโฟมมีความหนาแน่นสัมพัทธ์และความแข็งแรงจุดครากที่สูงขึ้น หรือจะอธิบายได้ว่าการดูดซับพลังงานที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากความแข็งแรงจุดครากที่สูงขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น ดังนั้นพื้นที่ใต้กราฟความเค้น – ความเครียดจึงสูงขึ้น [32, 33] จาก

เหตุผลข้างต้นส่งผลให้ค่าความเค้นพลาโตซึ่งคือความเค้นเฉลี่ยช่วงบริเวณที่ราบ (Plateau Region) ของกราฟความเค้น – ความเครียดสูงขึ้นตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นด้วย [34] ค่าความแข็งแรงจุดคราก ค่าความเค้นพลาโตและการดูดซับพลังงานของโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดโพรงอากาศ 8 12 และ 20 μm ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ขนาดของโพรงอากาศไม่มีผลต่อความแข็งแรงของโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม – ซิลิคอนคาร์ไบด์ เพราะความแข็งแรงวัดจากเนื้อของโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม – ซิลิคอนคาร์ไบด์

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

1 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการหล่อแทรกซึมด้วยความดันสามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 1 – 5 wt.% ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi โฟม AC3A ขนาดโพรงอากาศ 8, 12 และ 20 ppi และโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 1 – 5 wt.% ขนาดโพรงอากาศ 8, 12 และ 20 ppi ได้ โครงสร้างโฟมโดยทั่วไปมีโครงสร้างดี ลักษณะค่อนข้างเหมือนโฟมโพลียูรีเทนต้นแบบ แต่กระบวนการผลิตด้วยวิธีนี้ไม่สามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 12 และ 20 ppi และโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 1 – 5 wt.% ขนาดโพรงอากาศ 12 และ 20 ppi ได้ ทั้งยังไม่สามารถผลิตโฟมวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สูงกว่านี้ได้

2 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในโฟมวัสดุอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์ทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวที่ดีทั้งบนผิวงานโพรงอากาศและภายในเนื้อโฟม และที่ปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สูงขึ้น อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เริ่มจับตัวกันเป็นกลุ่มแต่ยังกระจายตัวได้ดี

3 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้นเมื่อขนาดโพรงอากาศเล็กลง แต่ที่ขนาดโพรงอากาศ 12 และ 20 ppi มีขนาดใกล้เคียงกันเป็นผลมาจากขนาดชิ้นงานโฟมที่เล็กและลักษณะการตัดชิ้นงานโฟม

4 ที่ขนาดโพรงอากาศเดียวกันที่ 8 ppi โฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสูงกว่าโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาดโพรงอากาศ เนื่องจากโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความหนาแน่นสูงกว่าโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A

5 ลักษณะกราฟความเค้น – ความเครียดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งมีความเหนียวสูง มีลักษณะค่อนข้างเรียบและมีช่วงบริเวณที่ราบ (Plateau Region) ยาว ส่วนลักษณะกราฟความเค้น – ความเครียดของโฟมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ซึ่งมีความเหนียวต่ำ มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นอย่างรุนแรงตลอดช่วงความเครียด และมีช่วงบริเวณที่ราบ (Plateau Region) สั้นกว่า

6 การเพิ่มสัดส่วนอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้โคมวัสดุอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์มีความเปราะสูงขึ้น สังเกตได้จากความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่สูงขึ้นของกราฟความเค้น – ความเครียด

7 การเพิ่มสัดส่วนอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้โคมวัสดุอะลูมิเนียม-ซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่าความแข็งแรงจุดคราก ค่าความเค้นในช่วงพลาโต ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานและค่าความแข็งที่สูงขึ้น

8 โคมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A มีค่าความแข็งแรงจุดคราก ค่าความเค้นในช่วงพลาโต และค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงกว่าโคมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจากอะลูมิเนียมผสมเกรด AC3A มีสมบัติทางกลสูงกว่าอะลูมิเนียม

9 สมบัติทางกล : ค่าความแข็งแรงจุดคราก ค่าความเค้นในช่วงพลาโตและค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน สูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้น

10 โคมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีค่าความเค้นในช่วงพลาโต และค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงกว่าโคมวัสดุผสมเนื้อพื้น AC3A ขนาดโพรงอากาศ 20 ไม่สัมพันธ์กันตามข้อสรุปที่ 9 เนื่องจากมีปัจจัยของความเปราะและรอยแตกเริ่มต้นมาเกี่ยวข้อง

6.2 ข้อเสนอแนะ

การผลิตด้วยกระบวนการหล่อแทรกซึ่มด้วยความดันมีข้อจำกัดคือกระบวนการผลิตที่ยู่งยาก ไม่สามารถผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ ชิ้นงานผลิตได้จึงมีปริมาณน้อย ถ้าสามารถผลิตชิ้นงานได้ขนาดใหญ่และปริมาณมากกว่านี้ ผลการทดลองที่ได้ก็จะชัดเจนยิ่งขึ้น

กระบวนการผลิตอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ควรจะทำในระบบสุญญากาศเพื่อป้องกันการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ เพื่อให้ผลการทดลองชัดเจนยิ่งขึ้น

การทำความสะอาดชิ้นงานโคมทำได้ยากเพราะต้องทำความสะอาดด้วยตู้ฉีดน้ำเพิ่มแรงดัน ซึ่งทางโรงงานที่ให้ความอนุเคราะห์ผลิตชิ้นงานโคมนั้น ไม่สามารถปรับแรงดันของตู้ฉีดน้ำ

ได้ ซึ่งทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ต้องประดิษฐ์เครื่องขึ้นเอง แต่ประสิทธิภาพพอใช้ อาจมีเศษปูน
ปลาสเตอร์จากแบบหล่อเหลือค้างในชิ้นงาน อาจเป็นผลให้ผลการทดลองผิดเพี้ยนได้

รายการอ้างอิง

- [1] Metal Foams. [Online]. <http://www.electron.rmutphysics.com> [2012, April 27]
- [2] Metal Foams. [Online]. <http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Metals> [2012, April 27]
- [3] Štádlar, C., and Lašová, V. Metal Foams – A New Promising Material For Engineering Design Applications. AEDS 2005 Workshop (November 2005).
- [4] Metal foams processing : direct foaming with gas. [Online]. <http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave> [2012, April 27]
- [5] Banhart, J. Metal Foams: Production and Stability. Advance Engineering Material 8 9 (2006) : 781 – 794.
- [6] Banhart, J., and Baumeister, J. Deformation Characteristic of Metal Foams. Journal of Material Science 33 (1998) : 1431 – 1440.
- [7] Conde, Y., and others. Replication Processing of Highly Porous Materials. Advance Engineering Material 8 9 (2006) : 795 – 803.
- [8] Banhart, J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress Mater Sci 46 (2001) : 559 - 632.
- [9] Al – Si phase diagram. [Online]. <http://www.al-mg.com/en/Al-50Si.html> [2012, April 27]
- [10] Van Horn, K.R. Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams Aluminium. Volume 1. American Society for Metals, 1967.
- [11] Matthews, F.L., and R.D. Rawling. Composite Materials: Engineering and Science. Chapman & Hall, 1994.
- [12] Soboyejo, W.O., and Srivatsan, T.S. Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization and Applications. CRC Press, 2006.
- [13] Ashby, M.F., and others. Metal Foams: A Design Guide. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [14] Simone, A.E., and Gibson, L.J. Aluminum Foams Produced by Liquid-State Process. Acta mater 46 9 : 3109 – 3123.

- [15] Gibson, L.J., and Ashby, M.F. Cellular Solids, Structure and Properties. 2nd edition. Cambridge University Press, 1997.
- [16] San Marchi, C., Despois, J.F., and Mortensen, A. Uniaxial deformation of open-cell aluminum foam : the role of internal damage. Acta Materialia 52 (2004) : 2895 – 2902.
- [17] Andrews, E., Sanders, W., Gibson, L.J. Compressive and tensile behaviour of aluminum foams. Materials Science and Engineering A 270 (1999) : 113 – 124.
- [18] San Marchi, C., and Mortensen, A. Deformation of Open-Cell Aluminum Foam. Acta Materialia 49 (2001) : 3959 – 3969.
- [19] Asavavisitchai. Production of Aluminium Foam by Powder Metallurgical Route. Nottingham, 2001. (Unpublished Manuscript).
- [20] Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., and Lehmus, D. Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi7 foam. Materials Science and Engineering A 424 (2006) : 290 – 299.
- [21] Sozhamannan, G.G., and Balasivanandha Prabu, S. Influence of interface compounds on interface bonding characteristic of aluminium and silicon carbide. Material Characterization 60 (2009) : 986 – 990.
- [22] Ip, S.W., Wang, Y., and Toguri, J.M. Aluminium foam stabilization by solid particles. Canadian Metallurgical Quarterly 38 (1999) : 81 - 92.
- [23] McCullough, K.Y.G., Fleck N.A., and Ashby, M.F. Uniaxial stress – strain behavior of aluminium alloy foams. Acta Mater 47 (1999) : 2323 - 2330
- [24] Boari, Z.M., Monteiro, W.A., and Jesus Miranda, C.A. Mathematical model predicts the elastic behavior of composite materials. Materials Research 8 1 (2005) : 99 - 103.
- [25] Grabowski, A., Nowak, M., and Sleziona, J. Optical and conductive properties of AlSi - alloy/SiCp composites: application in modelling CO₂ laser processing of composites. Optics and Lasers in Engineering 43 (2005) : 233 – 246.

- [26] Material properties. [Online]. <http://matweb.com> [2012, April 27]
- [27] Hashim, J., Looney, L., and Hashmi, M.S.J. The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy. Journal of Materials Processing Technology 119 (2001) : 324 – 328.
- [28] Dinsdale, A.T., and Quested, P.N. The viscosity of aluminium and its alloys – A review of data and models. Journal of Materials Science 39 (2004) : 7221 – 7228.
- [29] Xigui, S., Xiufang, B., Jingxiang, Z., and Jie, Z. Temperature-dependent viscosities of eutectic Al–Si alloys modified with Sr and P. Journal of Alloys and Compounds 479 (2009) : 670 – 673.
- [30] Gui, M.C., Wang, M.B., Wu, J.J., Yuan, G.J., and Li, C.G. Deformation and damping behavior of foamed Al–Si–SiC_p composite. Materials Science and Engineering A 286 (2000) : 282 – 288.
- [31] Andrews, E.W., Gioux, G., Onck, P., and Gibson, L.J. Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results. International Journal of Mechanical Sciences 43 (2001) : 701 – 703.
- [32] Luo, Y., Yu, S., Liu, J., Zhu, X., and Luo, Y. Compressive property and energy absorption characteristic of open-cell SiC_p/AlSi₉Mg composite foams. Journal of Alloys and Compounds 499 (2010) : 227 – 230.
- [33] Alizadeh, F., and Mirzaei – Aliabadi, M. Compressive properties and energy absorption behavior of Al – Al₂O₃ composite foam synthesized by space - holder technique. Materials and Design 35 (2012) : 419 – 424.
- [34] Ravi Kumar, N.V., Ramachandra Rao, N., Sudhakar, B., and Gokhale, A.A. Foaming experiments on LM25 alloy reinforced with SiC particulates. Materials Science and Engineering A 527 (2010) : 6082 – 6090.
- [35] Mondala, B., Kundua, S., Lohara, A.K., and Pai, B.C. Net-shape manufacturing of intricate components of A356/SiC_p composite through rapid-prototyping - integrated investment casting. Materials Science and Engineering A 498 (2008) : 37 – 41.

- [36] Ravi, K.R., Pillai, R.M., Amaranathan, K.R., Pai, B.C., and Chakraborty, M.
Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. Journal of Alloys and Compounds 456 (2008) : 201 – 210.
- [37] Lloyd, D.J. Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites.
International Materials Review 39 (1994) : 1 – 23.
- [38] มนต์ สติรจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1995.
- [39] Nieh, T.G., Higashi, K., and Wadsworth, J. Effect of cell morphology on the
compressive properties of open-cell aluminum foams. Materials Science and Engineering A 283 (2000) : 105 – 110.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นาย เอกภักดิ์ วิเชียรรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	วันอาทิตย์ที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2529
ที่อยู่	14 ถนนพลเดช ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ 81000
ประวัติการศึกษา	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนโกคาพาณิชย์อนุกุล มูลนิธิ จังหวัดกระบี่ ปี พ.ศ. 2541 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย จังหวัดตรัง ปี พ.ศ.2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ.2551
โทรศัพท์	086-894-2553