



โครงการการผลิตโฟมอะลูมิเนียมผสมเศษอะลูมิเนียมที่นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบ
แทรกซึมโดยใช้ความดัน

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

มิถุนายน 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการผลิตโฟมอะลูมิเนียมผสมเศษอะลูมิเนียมที่นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกรรมวิธี
การหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้ความดัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

| | |
|-------------------------|--|
| รหัสโครงการ: | MRG5380147 |
| ชื่อโครงการ: | การผลิตโฟมอะลูมิเนียมผสมเศษอะลูมิเนียมที่นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้ความดัน |
| ชื่อนักวิจัย และสถาบัน: | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| อีเมล: | fmtsas@eng.chula.ac.th |
| ระยะเวลาโครงการ: | 2 ปี |

โฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดใหม่ที่มีความเป็นไปได้ในการลดความหนาแน่นของวัสดุในขณะที่ยังสามารถรักษาสมรรถนะทางกลในระดับสูงได้ โฟมมีการรวมกันเป็นอย่างดีของสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล เช่น ความหนาแน่นที่ต่ำมาก ความแข็งแรงและมอดุลัสความยืดหยุ่นสูง และจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานที่ทำหน้าที่เฉพาะหรืองานด้านโครงสร้างได้ เนื่องจากโพรงอากาศที่ทะลุถึงกันได้จำนวนมากและขนาดพื้นที่ผิวภายในที่ใหญ่ทำให้มีการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวกรอง วัสดุแทนที่กระดูก ฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา และฉนวนกันเสียง ในกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด กรรมวิธีการแทรกซึมด้วยความดันเป็นวิธีที่นิยมมาก เนื่องจากมีความสามารถในการควบคุมโครงสร้างของโฟมและมีความจำเป็นในการดัดแปลงอุปกรณ์การหล่อที่ใช้กันทั่วไปเพียงเล็กน้อย การทำวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตสำหรับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิดที่ซึ่งเศษอะลูมิเนียมในปริมาณต่างๆ ได้ถูกนำมาผสมเข้าไป โครงสร้างโฟมจะถูกตรวจสอบในระดับมหภาคและจุลภาค สมบัติทางกลของโฟมที่มีปริมาณเศษอะลูมิเนียมที่แตกต่างกันจะถูกตรวจสอบเช่นกัน ความเป็นไปได้ของเทคนิคการผลิตโฟมด้วยกรรมวิธีนี้ร่วมกับการใช้วัสดุรีไซเคิลจะทำให้สามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีราคาถูกลงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมต่างๆ ที่ต้องการความพรุนที่เชื่อมต่อกันในระดับสูงและโครงสร้างที่เสถียร

คำหลัก: โฟมโลหะ, อะลูมิเนียม, รีไซเคิล, กระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น, สมบัติทางกล

Abstract

Project Code: MRG5380147
Project Title: Production of Aluminium Foam Mixed with Recycled Aluminium Waste by Pressure Infiltration Technique
Investigator: Asst. Prof. Dr. Seksak Asavavisithchai
Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
E-mail Address: fmtsas@eng.chula.ac.th
Project period: 2 years

Abstract:

Aluminium (Al) foam is a new promising engineering material that offers the possibility of reducing the density of material while maintaining a high level of mechanical performance. The foam has excellent combination of fundamental physical and mechanical properties as very low density, good strength and elastic modulus and high melting point which can be used in functional and structural applications. Due to a large number of interpenetrating pores and high internal surface areas of open-cell Al foams, a wide variety of applications such as heat exchangers, filter, bone-replacement implants, catalyst supports and sound insulators are currently employed. Among many fabrication methods of open-cell Al foam, the pressure infiltration technique is preferred because of the ability to control foam architecture and easy modification of conventional casting equipments. The present research aims to study this fabrication process for production of open-cell Al foam in which Al waste, in form of scrap, are added in various contents. The integrity of foam architecture will be examined through macro and microstructural analysis of the foams. Mechanical properties of the foams through variation of recycled Al waste concentration will also be examined. The feasibility of the production technique combined with material recycling would result in low-cost Al foams with friendly environment which can be used in many engineering applications where both highly interpenetrating porosity and integrity of materials are important.

Keywords: Metallic foam, Aluminium, Recycle, Investment casting, Mechanical properties

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเอาเศษอะลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการทำ Machining มาผลิตเป็นโฟมอะลูมิเนียม และเพื่อศึกษาถึงปริมาณของเศษอะลูมิเนียมที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม โดยจะทำการศึกษาในโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมในปริมาณต่างๆ กัน และจะศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณเศษอะลูมิเนียมต่อความแข็งแรงอัดและความแข็งของโฟมอะลูมิเนียม

ในการทำวิจัยนี้ ได้มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยเริ่มต้นจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ และทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) รวมถึงหาส่วนผสมทางเคมีโดยใช้เครื่อง XRF (X-ray fluorescence) และทำการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมกับเศษอะลูมิเนียมที่มาจาก Machining ของชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยทำการผลิตที่ส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมที่ 0, 10, 30 และ 50 wt.% กับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ สำหรับการหล่อต้นแบบโฟม จะทำการสร้างแม่พิมพ์ปูนหล่อโฟมอะลูมิเนียมด้วยโฟมโพลียูรีเทน (PU foam) ที่มีขนาดโพรงอากาศ 8 และ 12 ppi และนำไปหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้แรงดัน ที่ 1200°C นำชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค และทำการทดสอบความแข็งแรงอัดและความแข็งของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ได้

จากผลการวิจัยทำให้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมด้วยความดัน สามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 8 และ 12 ppi ที่มีโครงสร้างโฟมสมบูรณ์ได้ที่อุณหภูมิการหล่อ 1200°C โดยสามารถใช้ปริมาณเศษอะลูมิเนียมได้มากถึง 50 wt.%
- โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมมีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของโฟมโพลียูรีเทนที่ใช้เป็นต้นแบบ ไม่มีตำหนิขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อโครงสร้าง มีเพียงตำหนิขนาดเล็ก เช่น มีผิวหยาบ และมีเศษปูนขนาดเล็กเกาะติดอยู่ที่ผิว
- โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 สำหรับทุกส่วนผสม มีโครงสร้างแบบ Dendrite และมีเฟส Eutectic Si ชนิดเข็ม (Acicular) ในเนื้อพื้นโลหะ
- โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมที่มีขนาดโพรงอากาศแตกต่างกันทั้งสองขนาด มีความเค้นอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น แต่โฟมที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่ามีขนาดการเพิ่มขึ้นของความเค้นอัดสูงกว่า

- โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมที่มีขนาดโพรงอากาศแตกต่างกันทั้งสองขนาด มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของโฟมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันสำหรับที่ปริมาณเศษอะลูมิเนียมเท่ากัน
- การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเป็นผลมาจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ Si ในเนื้อพื้นโลหะ และอาจเกิดจากอนุภาคออกไซด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในชิ้นงานโฟม

คำนำ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนในรูปของทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2553 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้ความดัน การทำวิจัยนี้ได้ทำการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในสัดส่วนปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้ต้นแบบที่ทำจากโฟมพอลิเมอร์ที่มีขนาดโพรงอากาศ 8 และ 12 ppi และทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟม รวมทั้งทำการทดสอบสมบัติทางกลของโฟม

โฟมอะลูมิเนียมจัดอยู่ในประเภทโฟมโลหะซึ่งเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดใหม่ที่เพิ่งได้รับการพัฒนาในระยะเวลาไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา จุดเด่นของโฟมอะลูมิเนียมคือการมีสมบัติทางกลที่ดีในขณะที่มีน้ำหนักที่เบามาก จึงเหมาะกับการใช้งานในทางโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา เช่น รถยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศ เป็นต้น ผู้วิจัยหวังว่าผลจากการวิจัยนี้จะช่วยทำให้นักวิจัย หน่วยงาน และภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้มีความสนใจ และทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในเรื่องของโฟมอะลูมิเนียมสำหรับประเทศไทยให้มีความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ต่านชัยวิจิตร ที่ช่วยกรุณาแนะนำ และให้แนวทางในการทำวิจัยแก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณ คุณณัฐธิดา เจริญเกียรติบวร และคุณอารียา ศรีชัยพฤกษ์ ในการช่วยเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ และช่วยทำการทดลองบางส่วนในโครงการวิจัยนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย
ผู้วิจัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | i |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ii |
| บทสรุปผู้บริหาร..... | iii |
| คำนำ..... | v |
| สารบัญ..... | vi |
| สารบัญรูปภาพ..... | ix |
| สารบัญตาราง..... | xi |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย..... | 2 |
| บทที่ 2 การทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาในอดีต..... | 3 |
| 2.1 โฟมโลหะ..... | 3 |
| 2.2 ลักษณะรูปร่างของโพรงอากาศของโฟมโลหะ..... | 3 |
| 2.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ..... | 3 |
| 2.4 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ..... | 4 |
| 2.5 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ..... | 4 |
| 2.6 การนำไปใช้งานสำหรับโฟมโลหะ..... | 4 |
| 2.7 โฟมอะลูมิเนียม..... | 5 |
| 2.8. การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด..... | 6 |
| 2.8.1 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการถอดแบบโดยใช้แม่พิมพ์เกลือ.... | 6 |
| 2.8.2 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น..... | 7 |
| 2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่น..... | 7 |
| 2.9.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม..... | 7 |
| 2.9.2 ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม..... | 8 |
| 2.9.3 เวลาที่ใช้ในการให้ความดัน..... | 9 |
| 2.9.4 วัสดุที่ใช้ในการผลิตต้นแบบ..... | 9 |
| 2.9.5 วัสดุที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม..... | 9 |
| 2.9.6 ความหนืดของน้ำโลหะหลอมเหลว..... | 10 |
| 2.10 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ..... | 11 |

| | |
|---|----|
| 2.10.1 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด..... | 12 |
| 2.10.2 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด..... | 14 |
| 2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของโฟมโลหะ..... | 15 |
| 2.11.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิต..... | 16 |
| 2.11.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์..... | 16 |
| 2.11.3 ชนิดโครงสร้างของโฟมโลหะ..... | 18 |
| 2.11.4 ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ..... | 19 |
| 2.11.5 ตำหนิของโฟมโลหะ (Defects)..... | 21 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 22 |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย..... | 22 |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... | 22 |
| 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 23 |
| 3.3.1 การเตรียมแบบเทียบสำหรับหล่อ..... | 23 |
| 3.3.2 การเตรียมวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียม..... | 23 |
| 3.3.3 การเตรียมอะลูมิเนียมก่อนการทำการหล่อ..... | 23 |
| 3.3.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม..... | 24 |
| 3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน..... | 24 |
| 3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง..... | 25 |
| 3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... | 25 |
| 3.5 การทดสอบสมบัติทางกล..... | 25 |
| 3.5.1 การทดสอบแรงอัด..... | 25 |
| 3.5.2 การทดสอบความแข็ง..... | 25 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย..... | 26 |
| 4.1 คุณลักษณะของเศษโลหะอะลูมิเนียม..... | 26 |
| 4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม..... | 26 |
| 4.2.1 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์..... | 26 |
| 4.2.1.1 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์โพรงอากาศขนาด 8 ppi | 26 |
| 4.2.1.2 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์โพรงอากาศขนาด 12 ppi | 27 |
| 4.2.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi | 28 |
| 4.2.2.1 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.%..... | 28 |
| 4.2.2.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 | 29 |

| | |
|---|----|
| wt.%..... | |
| 4.2.2.3 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.%..... | 30 |
| 4.2.3 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi | 31 |
| 4.2.3.1 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.%..... | 31 |
| 4.2.3.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.%..... | 32 |
| 4.2.3.3 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.%..... | 33 |
| 4.3 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์..... | 34 |
| 4.3.1 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์..... | 34 |
| 4.3.2 โครงสร้างจุลภาคโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12..... | 35 |
| 4.3.2.1 โฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศขนาด 8 ppi..... | 35 |
| 4.3.2.2 โฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศขนาด 12 ppi..... | 36 |
| 4.4 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม..... | 37 |
| 4.4.1 ความแข็งแรงอัด..... | 37 |
| 4.4.2 ความแข็ง..... | 39 |
| บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง..... | 41 |
| 5.1 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์..... | 41 |
| 5.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12..... | 42 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 44 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย..... | 44 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต..... | 44 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 46 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 โฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบ (a) ปิด และ (b) เปิด..... | 3 |
| รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการถอดแบบโดยใช้แม่พิมพ์เกลือ..... | 6 |
| รูปที่ 2.3 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น..... | 7 |
| รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟมต่อความดันที่ใช้ในการแทรกซึม... | 8 |
| รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของอะลูมิเนียมที่ซิลิคอน wt.% ต่าง ๆ กัน (Al-Si phase diagram)..... | 10 |
| รูปที่ 2.6 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม..... | 11 |
| รูปที่ 2.7 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะในอุดมคติ..... | 11 |
| รูปที่ 2.8 กราฟความเค้น-ความเครียดสำหรับการหาค่าความสามารถในการดูดซับแรง กระแทก..... | 12 |
| รูปที่ 2.9 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดที่ความหนาแน่น 0.16 g/cm ³ | 13 |
| รูปที่ 2.10 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิด โฟมอะลูมิเนียม บริสุทธิ์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และโฟม Al-12Si ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.27..... | 14 |
| รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับมอดุลัสของยังหรือมอดุลัสยืดหยุ่น ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas | 16 |
| รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความเค้นสูงสุด ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas | 17 |
| รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความแข็งแรง ณ จุดคราก ของโฟม โลหะ..... | 17 |
| รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบแรงอัดอัตราระหว่าง โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิด และแบบเปิด..... | 18 |
| รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสัมพัทธ์กับ L/d | 20 |
| รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากสัมพัทธ์กับ L/d..... | 20 |
| รูปที่ 3.1 ต้นเทียนที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิต..... | 23 |
| รูปที่ 4.1 ลักษณะเศษโลหะอะลูมิเนียม เกรด ADC12..... | 26 |
| รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi | 27 |
| รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่..... | 28 |
| รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi | 29 |
| รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi | 30 |
| รูปที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 | 31 |

| | |
|--|----|
| ในปริมาณ 50 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi | |
| รูปที่ 4.7 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 | 32 |
| ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi | |
| รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 | 33 |
| ในปริมาณ 30 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi | |
| รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 | 34 |
| ในปริมาณ 50 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi | |
| รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 และ 12 ppi... | 35 |
| รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi ที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณต่างๆ..... | 35 |
| รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณต่างๆ..... | 36 |
| รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 และ 12 ppi | 37 |
| รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีขนาดโพรงอากาศขนาด 8 ppi ในแต่ละอัตราส่วนของเศษอะลูมิเนียมที่ผสม..... | 38 |
| รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีขนาดโพรงอากาศขนาด 12 ppi ในแต่ละอัตราส่วนของเศษอะลูมิเนียมที่ผสม..... | 39 |
| รูปที่ 4.16 กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi | 40 |
| รูปที่ 4.17 กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi | 40 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ การนำไปใช้งาน และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ของโพลีโพลีเอสเตอร์..... | 5 |
| ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด ADC12..... | 26 |
| ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณซิลิกอนในแต่ละอัตราส่วนผสม..... | 37 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

โฟมโลหะเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดใหม่ ที่มีศักยภาพสูงที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากโฟมโลหะมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการดูดซับพลังงานจากการอัดกระแทกและมีน้ำหนักที่เบากว่าโลหะทั่วไปมาก นอกจากนี้โฟมโลหะยังสามารถนำไปใช้ในการคัดขนาดอนุภาค เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี มีสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี มีพื้นที่ผิวสูงจึงเหมาะสำหรับการใช้งานเป็นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา

กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะนั้นมีมากมายหลายประเภท กรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมด้วยความดันก็เป็นหนึ่งในการผลิตโฟมโลหะที่เป็นที่นิยมเพื่อให้ได้โฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด โดยใช้หลักของการสร้างโพรงอากาศจำลองขึ้นในเนื้อโลหะโดยใช้วัสดุต้นแบบที่ผลิตจากโฟมพอลิเมอร์ แล้วทำการกำจัดต้นแบบนี้เสีย โดยการเผาหรือการละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมเมื่อผลิตแบบหล่อแม่พิมพ์เสร็จ ด้วยวิธีนี้ ลักษณะและขนาดของโพรงอากาศในโฟมจะมีลักษณะและขนาดเดียวกับต้นแบบโฟมพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ จากการเลือกใช้ต้นแบบที่เหมาะสม จะทำให้สามารถควบคุมลักษณะโครงสร้างของโฟมโลหะที่สร้างขึ้นได้ และทำให้ได้โฟมที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลตามที่ต้องการ

โดยทั่วไปจะนิยมใช้โลหะอะลูมิเนียมสำหรับการผลิตโฟมโลหะ เพราะเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีความสำคัญทางวิศวกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักสูง สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย มีคุณสมบัติต้านทานการผุกร่อนดีและไม่เป็นสนิม

เนื่องจากในกระบวนการผลิตชิ้นงานที่ทำจากอะลูมิเนียม จะมีของเสียที่เป็นเศษอะลูมิเนียมอยู่จำนวนมาก โดยทั่วไปจะนำเศษอะลูมิเนียมเหล่านี้ไปทำการรีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นอะลูมิเนียมใหม่ การรีไซเคิลเศษอะลูมิเนียมโดยทั่วไปจะสามารถผลิตอะลูมิเนียมได้ในปริมาณ 50-70% ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของกรรมวิธีการรีไซเคิลและชนิดของเศษอะลูมิเนียมเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังมีความกังวลในเรื่องของคุณภาพของอะลูมิเนียมที่ผ่านการรีไซเคิลสำหรับการใช้งานบางประเภทที่ต้องการความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมสูงมาก อย่างไรก็ตาม การนำอะลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งก็เป็นการดีกว่าที่จะต้องทำการผลิตอะลูมิเนียมขึ้นมาใหม่ เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมจากการนำอะลูมิเนียมมาใช้ใหม่จะเท่ากับ 5% ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมใหม่ทั้งหมด นอกจากนี้การนำเศษอะลูมิเนียมมาใช้ใหม่ยังเป็นการช่วยรักษาสภาพสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณขยะ และประหยัดค่าใช้จ่ายในตัววัสดุ

การนำเศษอะลูมิเนียมมาผสมกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์หรืออะลูมิเนียมอัลลอยเพื่อผลิตเป็นโฟมอะลูมิเนียมก็เป็นอีกหนทางหนึ่งที่จะรีไซเคิลเศษอะลูมิเนียม และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเศษอะลูมิเนียมอีกด้วย นอกจากนี้ ด้วยลักษณะการใช้งานอันเนื่องมาจากลักษณะทางโครงสร้างเฉพาะ

ของโพลีเอทิลีนที่ประกอบไปด้วยโพรงอากาศจำนวนมาก ทำให้ผลเสียที่เกิดจากออกไซด์ และสารปนเปื้อนที่ติดมากับโพลีเอทิลีนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติทางกลของโพลี

ดังนั้นในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้ทำวิจัยมีความต้องการที่จะศึกษาและผลิตโพลีเอทิลีนที่ผสมด้วยโพลีเอทิลีนที่ได้จากการผลิตชิ้นงานโพลีเอทิลีนทั่วไป โดยจะทำการผลิตโพลีเอทิลีนจากกรรมวิธีการใช้ความดันในการแทรกซึมของน้ำโลหะโพลีเอทิลีน (Pressure infiltration) และทำการตรวจสอบอิทธิพลที่ได้รับจากตัวแปรที่สำคัญในการผลิตที่มีผลต่อโครงสร้าง ส่วนประกอบทางเคมี สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของโพลีเอทิลีน เพื่อผลิตโพลีเอทิลีนที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมในสาขาต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อศึกษากระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนที่ผสมโพลีเอทิลีนด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้ความดัน
- เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโพลีเอทิลีนต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีน
- เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโพลีเอทิลีนที่มีโพลีเอทิลีนผสมอยู่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ผลิตโพลีเอทิลีนที่ผสมโพลีเอทิลีนด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้แรงดัน
- ใช้โพลีโพลีเอทิลีนที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดเป็นต้นแบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

- สามารถนำโพลีเอทิลีนมาใช้ใหม่ในการผลิตโพลีเอทิลีน ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และลดพลังงานที่ใช้ในการผลิตโพลีเอทิลีนใหม่
- มีความรู้ความเข้าใจในการผลิตโพลีเอทิลีนด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึม
- สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาโพลีเอทิลีนประเภทอื่น
- สามารถนำข้อมูลและชิ้นงานที่ได้จากการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ หรือ บีโตร์เคมี
- มีผลงานวิจัยที่มีคุณภาพที่สามารถตีพิมพ์ในวารสารงานวิจัยของต่างประเทศ
- เป็นการวางรากฐานและพัฒนาบุคลากรสำหรับการผลิตโพลีเอทิลีนในประเทศไทย

บทที่ 2

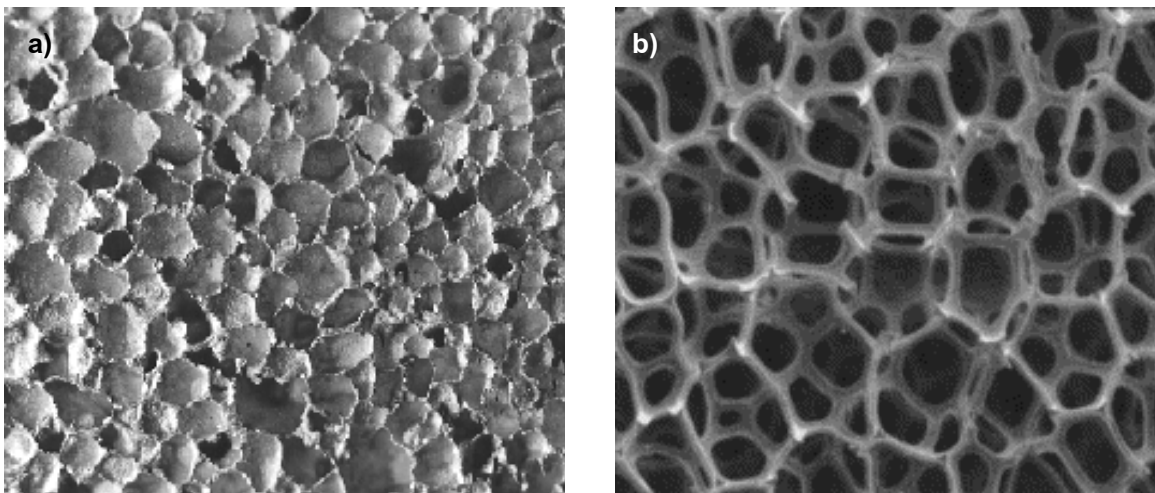
การทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาในอดีต

2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันในปริมาตรเท่ากัน มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงและมีสมบัติเด่นอีกหลายประการ [1] โฟมโลหะยังมีลักษณะเด่นซึ่งสามารถจำแนกได้ในเทอมของรูปร่างของโพรงอากาศ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ปริมาณของโพรงอากาศ และขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ

2.2 ลักษณะรูปร่างของโพรงอากาศของโฟมโลหะ

ลักษณะรูปร่างของโพรงอากาศ หรือที่นิยมเรียกกันว่าเซลล์ (Cell) ของโฟมโลหะ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของความพรุน (Porosity) ในโฟมโลหะสามารถจำแนกได้เป็น โพรงอากาศแบบปิด (Closed-cell) และโพรงอากาศแบบเปิด (Open-cell) โดยโพรงอากาศแบบปิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับมีเยื่อหุ้มปิดล้อมรอบโพรงอากาศ สำหรับโพรงอากาศแบบเปิดนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับร่างแหต่อกันในด้านข้างของโพรงอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยคุณสมบัติของโฟมโลหะจะขึ้นอยู่กับรูปแบบและโครงสร้างโพรงอากาศของโฟม



รูปที่ 2.1 โฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบ (a) ปิด และ (b) เปิด [2]

2.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของโฟมโลหะ) ρ^* (ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตร) Volume fraction) ของโลหะชนิดนั้นๆ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถแสดงได้ในสมการ (2.1)

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

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะและ ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งความหนาแน่นของโฟมโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน

2.4 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ

ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ (P) ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตรของโลหะชนิดนั้นๆ โดยปริมาณของโพรงอากาศสามารถแสดงได้ในสมการ (2.2)

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

2.5 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ

สมบัติทางกลของโฟมโลหะนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ ความแตกต่างของวิธีการผลิตนั้นส่งผลให้เกิดชนิดของโครงสร้างโพรงอากาศที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ ขนาดของโพรงอากาศที่มีความแตกต่างกัน จะมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงานทดสอบ) Size effect) ซึ่งจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการออกแบบและทดสอบวัสดุ

นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศที่แตกต่างกันนั้นยังส่งผลให้ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) และความแข็งแรง (Strength) แตกต่างกันไป มีการพบว่าถ้าค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะเป็นไปตามที่กำหนดไว้ รูปร่างของโพรงอากาศจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ อย่างไรก็ตามขนาดของโพรงอากาศก็ยังคงเป็นตัวแปรสำคัญและมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะอยู่

2.6 การนำไปใช้งานสำหรับโฟมโลหะ

การนำไปใช้งานของโฟมโลหะนั้น จะนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากโฟมโลหะมีความหนาแน่นต่ำและความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จึงถูกนำไปใช้ในทางด้านโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงพอประมาณ

ส่วนการนำไปใช้งานด้านอื่นๆ สามารถยกตัวอย่างได้ เช่น ด้านการแพทย์ เนื่องจากสามารถควบคุมความหนาแน่นได้ จึงนำไปอัดเป็นชั้นให้มีลักษณะคล้ายกับส่วนนอกของกระดูกได้ ตารางที่ 2.1 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ การนำไปใช้งานและรูปแบบของผลิตภัณฑ์

| คุณสมบัติ | การนำไปใช้งาน | รูปแบบของผลิตภัณฑ์ |
|---|---|--|
| High specific bending stiffness and strength | - แผ่นวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบาในการขนส่งหรือทางสถาปัตยกรรม | - Shaped parts - (Sandwich) panels - 3d-shaped (Sandwich) panels |
| Isotropic absorption of impact energy at a nearly constant low stress level | - ชั้นส่วนรองรับแรงในชั้นส่วนรถยนต์ - วัสดุห่อหุ้ม - วัสดุป้องกันความเสียหายจากการกระแทก | - Shaped parts - Large panels |
| Good sound absorption, electromagnetic shielding, and vibration damping | - ติดผนังป้องกันเสียง - กล่องบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ - วัสดุป้องกันเสียงจากเครื่องยนต์ - วัสดุดูดซับเสียงบริเวณถนนหรือทางรถไฟ | - Large panels - Sandwich panels |
| High thermal stability and low Thermal conductivity | - ฉนวนป้องกันความร้อน | - Large panels |
| Decorative, non-combustible, weather resistant | - เฟอร์นิเจอร์ - ติดผนัง | - Large panels - Shaped parts |
| Light-weight | - ใสบแบบหล่อทราย - วัสดุลอยน้ำ | - Complex shaped parts with a dense surface skin |
| High inner surface | - อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน - ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา - ใช้ในงานด้านCryogenic | - Complex open-cell parts |

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ การนำไปใช้งาน และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ของโฟมโลหะ

2.7 โฟมอะลูมิเนียม

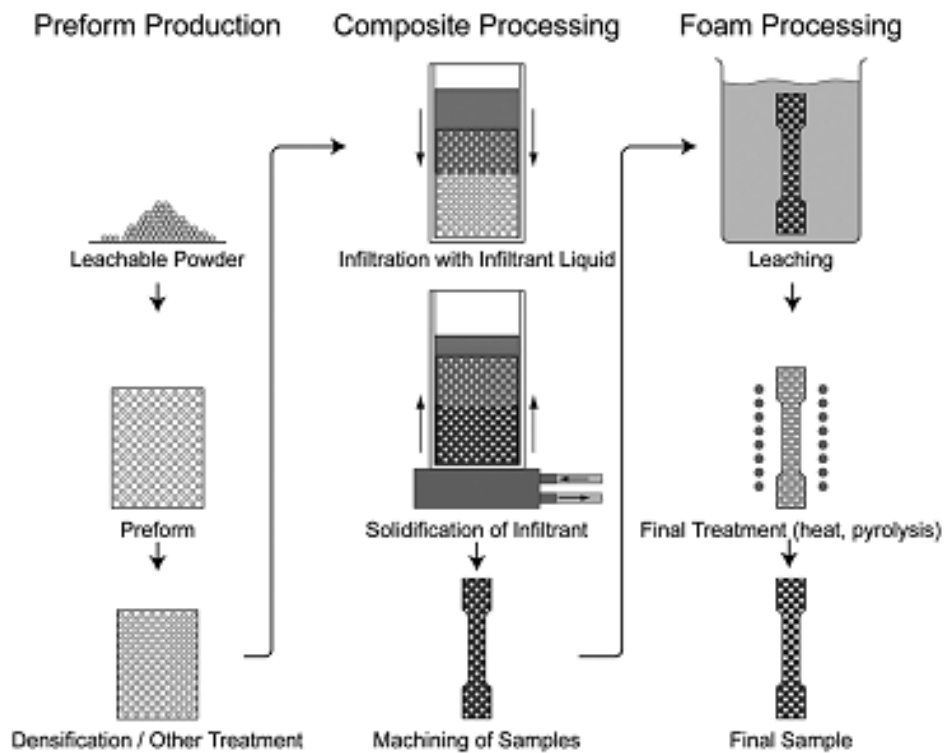
โฟมอะลูมิเนียม คือ โฟมที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโฟม โดยโฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ประกอบด้วยโพรงอากาศที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม โฟมอะลูมิเนียมมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูงในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดที่ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับตกแต่งได้อีกด้วย สามารถนำมารีไซเคิลได้และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมสามารถควบคุมได้จากการควบคุมรูปร่างของโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียม ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการควบคุมรูปร่างของ

โพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้สมบัติทางกลตามที่ต้องการ การใช้งานหลักๆของโฟมอะลูมิเนียม คือ ใช้เป็นอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกในรถยนต์ ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ และใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียงบนถนน

2.8. การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด

2.8.1 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการถอดแบบโดยใช้แม่พิมพ์เกลือ

การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการถอดแบบ (Replication Process) โดยใช้แม่พิมพ์เกลือมีขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตคือการทำชิ้นงานตั้งต้นที่เรียกว่า Preform ทำได้โดยการนำวัสดุผงที่สามารถละลายน้ำได้ หรือล้างออกได้ โดยส่วนใหญ่ใช้ผงเกลือ (NaCl) นำมาอัดขึ้นรูป แล้วนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งจะช่วยให้เม็ดเกลือแต่ละเม็ดเชื่อมติดกัน จากนั้นทำการฉีดน้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าไปใน Preform เพื่อให้ น้ำโลหะอะลูมิเนียมแทรกตัวลงในช่องว่างระหว่างผงเกลือ เมื่อ Preform เย็นตัว และแข็งตัวเรียบร้อยแล้วจะนำไปละลายเอาผงเกลือออก ซึ่งจะทำให้ได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศที่มีลักษณะเช่นเดียวกับกับผงเกลือ [3] ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2

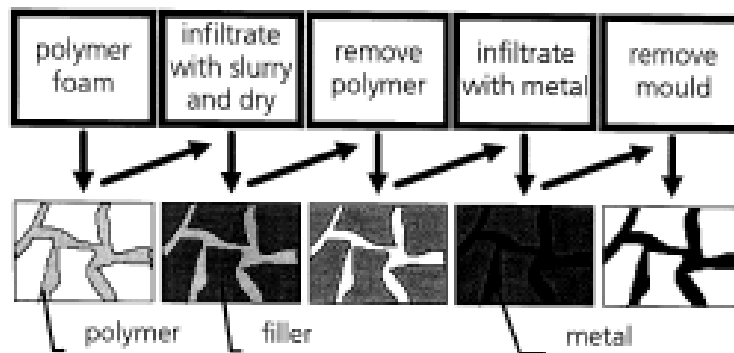


รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการถอดแบบโดยใช้แม่พิมพ์เกลือ [3]

2.8.2 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น

การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น (Investment casting) จะนิยมใช้สำหรับโลหะที่ต้องการรูปทรงที่แม่นยำถูกต้องจากต้นแบบ โดยกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการเตรียมต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยส่วนมากจะใช้โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane foams) ซึ่งเป็นโฟมพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง หลังจากนั้นจึงเติมน้ำสลิปเซรามิก หรือเรียกว่า Casting slurry ต่อมาจึงนำไปให้ความร้อนจนทำให้โฟมโพลียูรีเทนสลายตัวเกิดเป็นช่องว่าง โดยทำการหล่อโดยฉีดน้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าสู่ช่องว่าง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัว และนำเอาโฟมอะลูมิเนียมออก อาจนำไปเผาผืนต่อไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงอีกทางหนึ่งได้ [2] ซึ่งการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีนี้มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

- ข้อดี คือ ได้ระบบที่ไม่ยุ่งยาก, โครงสร้างตามแบบที่ต้องการ, โครงสร้างที่ได้สม่ำเสมอ เช่นเดียวกับต้นแบบ, สามารถใช้กับวัสดุได้หลากหลาย
- ข้อเสีย คือ โพรงอากาศขนาดเล็กทำได้ยาก, ทำชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ยาก, ผลิตได้เฉพาะโฟมโครงสร้างแบบเปิดเท่านั้น, อัตราการผลิตต่ำ



รูปที่ 2.3 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อจากแบบพอกหุ่น [2]

2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่น

2.9.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีผลต่อการเติมเต็มช่องว่างของน้ำโลหะอะลูมิเนียม ถ้าให้ความร้อนอะลูมิเนียมให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย เมื่อทำการหล่อน้ำโลหะก็จะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้หล่อไม่เต็มแบบ แต่ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะลดลง การที่จะหล่อให้เต็มแบบได้ดีนั้นอุณหภูมิหล่อเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลเกี่ยวข้องกับความหนืด จากสมการของ Arrhenius

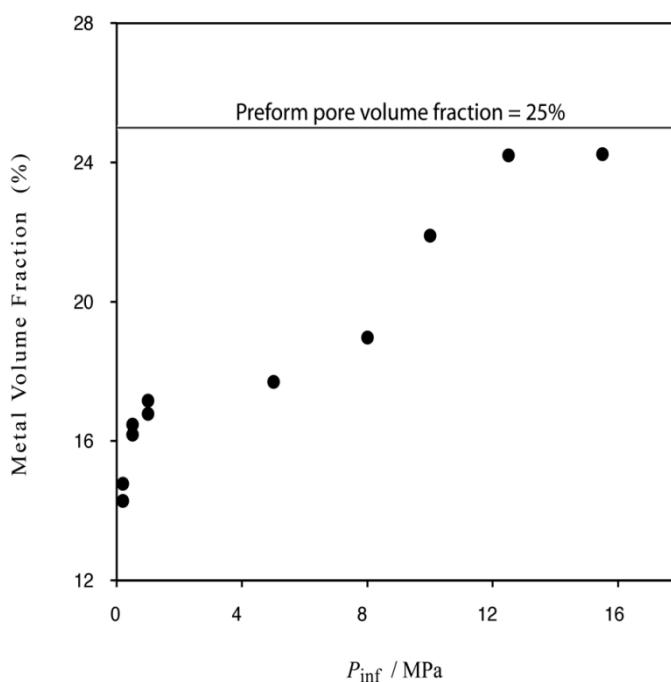
$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.3)$$

โดย η คือความหนืดมีหน่วยเป็น MPa/s
 η_0 คือค่าคงที่ pre – exponential ของความหนืด
 E_a คือค่า activation energy
 R คือค่าคงที่ของแก๊ส
 T คืออุณหภูมิ [4]

ซึ่งการใช้อุณหภูมิที่ใช้ผลิตโฟมอะลูมิเนียมสูงกว่าจุดหลอมเหลวในระดับที่เหมาะสม การเติมเติมแบบก็จะเป็นไปด้วยดี แต่ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมสูงเกินไป การเติมเติมแบบก็จะเป็นไปด้วยดีเช่นกัน แต่จะเกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน และอาจจะมีผลกระทบต่อผิววัสดุหลังจากการหล่ออีกด้วยเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน สรุปก็คือการใช้อุณหภูมิในการหล่อควรจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม

2.9.2 ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม

ความดันที่ใช้จะต้องสัมพันธ์กันกับขนาดของโพรงอากาศของต้นแบบ ความเรียบของผิวข้างในแม่พิมพ์ จากการศึกษาการผลิตโฟมอะลูมิเนียมแบบหล่อโดยใช้แม่พิมพ์เกลื้อจะเห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ของการใช้ความดันที่เพิ่มขึ้นต่ออัตราส่วนปริมาตรของอะลูมิเนียมของโฟมที่ผลิตได้ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่า โฟมที่มีความหนาแน่นสูงความดันที่ใช้ในการผลิตก็จะสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟมต่อความดันที่ใช้ในการแทรกซึม [3]

การให้ความดันควรให้ในระดับที่เหมาะสม ถ้าน้อยเกินไปน้ำอะลูมิเนียมก็จะเติมไม่เต็มแบบ แต่ถ้าให้ความดันมากเกินไป อาจเกิดความเสียหายต่อแม่พิมพ์และเครื่องมือได้

2.9.3 เวลาที่ใช้ในการให้ความดัน

การให้ความดัน ถ้าให้ความดันในเวลาที่น้อยเกินไป น้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะเติมไม่เต็มแบบ ในทางตรงกันข้ามถ้าให้ความดันในเวลาที่นานเกินไปอาจทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมดันแม่พิมพ์จนเกิดการเสียหาย และอาจเกิดการรั่วซึมได้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

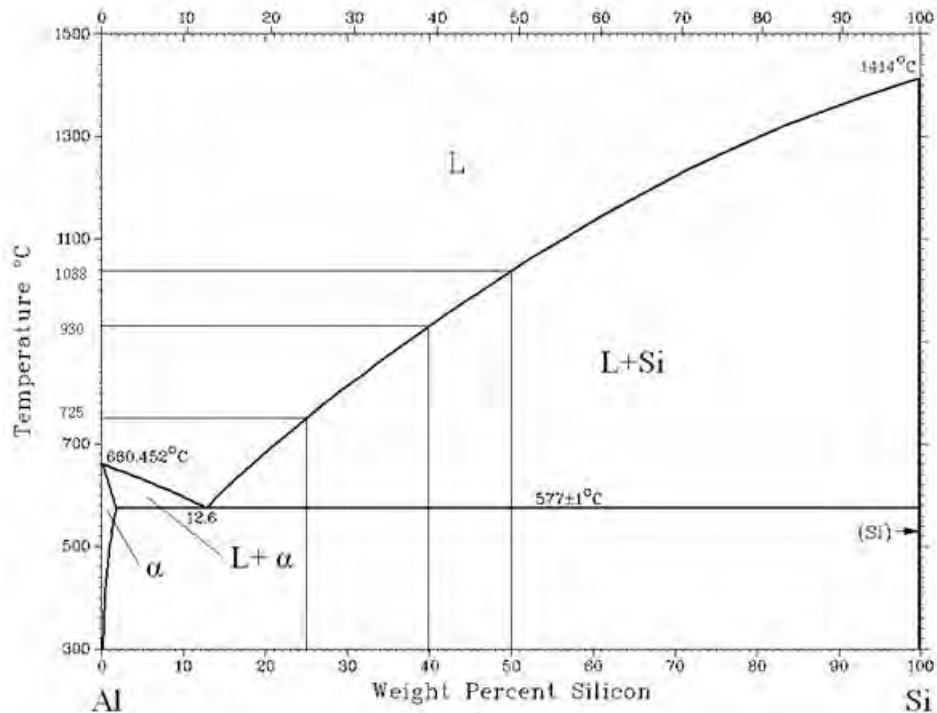
2.9.4. วัสดุที่ใช้ในการผลิตต้นแบบ

วัสดุที่ใช้ผลิตต้นแบบนั้น คือโฟมพอลิเมอร์ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้โฟมโพลียูรีเทน ซึ่งโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะเหมือนกับโฟมต้นแบบทุกประการ วัสดุที่ใช้ผลิตต้นแบบจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะที่ใช้ในการหล่อและยังต้องสลายได้ง่ายเมื่อถูกกำจัดด้วยความร้อน

ขนาดโพรงอากาศและความหนาของกึ่งก้านของโฟมโพลียูรีเทนจะมีผลต่อการใช้ความดันในการแทรกซึม ความดันที่ใช้จะต้องมากกว่าความดันขีดเริ่ม (Threshold Pressure) ซึ่งก็คือความดันที่น้อยที่สุดที่จะทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลเข้าแบบได้ ค่าความดันขีดเริ่มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแบบหล่อและความสามารถในการเป็ยกระหว่างวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อกับน้ำโลหะอะลูมิเนียม ถ้าเป็ยกันได้ดีอาจจะไม่ต้องใช้ความดันช่วยในการให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าแบบหล่อ ซึ่งก็คือค่าความดันขีดเริ่มมีค่าติดลบ แต่ถ้าทั้งวัสดุที่ใช้ผลิตแบบหล่อกับน้ำโลหะอะลูมิเนียมเป็ยกันได้ไม่ดีนัก จึงต้องใช้ความดันในการช่วยให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลเข้าแบบได้ ซึ่งความดันที่ใช้ยิ่งสูงกว่าความดันขีดเริ่มมากเท่าไรน้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะเติมเต็มแบบได้มากขึ้น ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้กับอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟมรูปที่ 2.4

2.9.5. วัสดุที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตโฟมโลหะคืออะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมอัลลอย โดยที่ในกระบวนการผลิต อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงจึงใช้พลังงานในการหลอมเหลวสูง การเติมธาตุผสมบางตัวเช่น ซิลิคอน จะช่วยในการลดจุดหลอมเหลวลง ดังกราฟในรูปที่ 2.5 โดยที่การผสมซิลิคอนในปริมาณ 12.6 wt.% จะลดจุดหลอมเหลวให้ต่ำที่สุดที่ 577°C ส่งผลให้ใช้พลังงานในการหลอมน้อยลง และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของน้ำอะลูมิเนียม

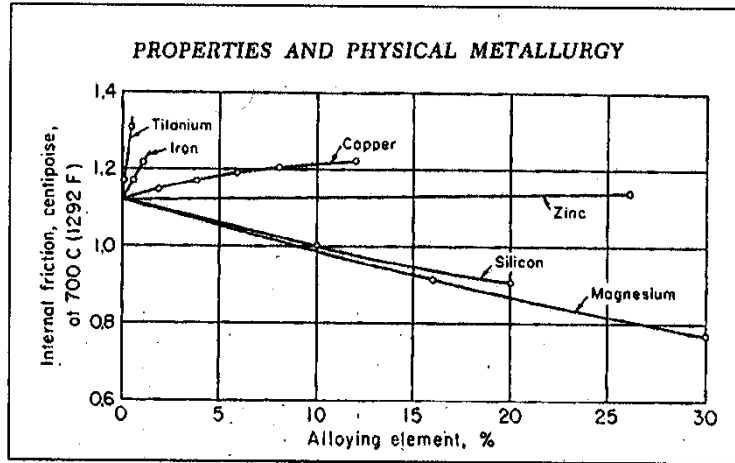


รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของอะลูมิเนียมที่ซิลิคอน wt.% ต่าง ๆ กัน (Al-Si phase diagram) [5]

2.9 6. ความหนืดของน้ำโลหะหลอมเหลว

ความหนืดสูงมีผลต่อการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียม น้ำโลหะอะลูมิเนียมจะไหลผ่านช่องว่างที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กได้ยาก เป็นผลให้เกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะก่อนจะเต็มเต็มแบบ เพราะฉะนั้นน้ำโลหะควรจะมีค่าความหนืดต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อาจจะเป็นปัญหาสำหรับการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบางชนิด เพราะขณะหลอมเหลวจะมีความหนืดสูงมาก

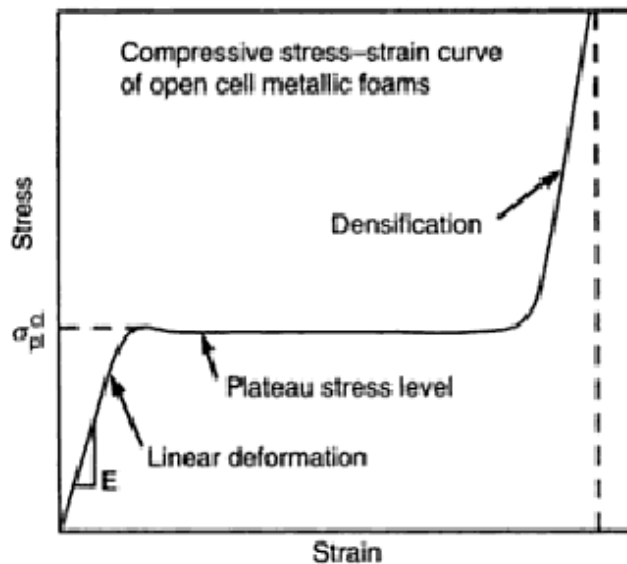
การลดความหนืดของน้ำโลหะอาจทำได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะดังที่กล่าวมาแล้ว หรืออาจทำได้ด้วยการเติมธาตุผสมบางชนิด เช่น Si หรือ Mg เป็นต้น ดังรูปที่ 2.6 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีผลต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.6 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [6]

2.10 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ

การนำไปใช้งานของโฟมอะลูมิเนียมโดยส่วนใหญ่มักนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในงานประเภทรับแรงกระทำ การรับแรงอัดของโฟมโลหะโดยทั่วไปเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัด 3 ขั้นตอนคือ การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) บริเวณที่ราบ (Plateau stress) และช่วงการอัดแน่น (Densification) แสดงไว้ดังกราฟในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเป็นพฤติกรรมการรับแรงอัดแบบอุดมคติ

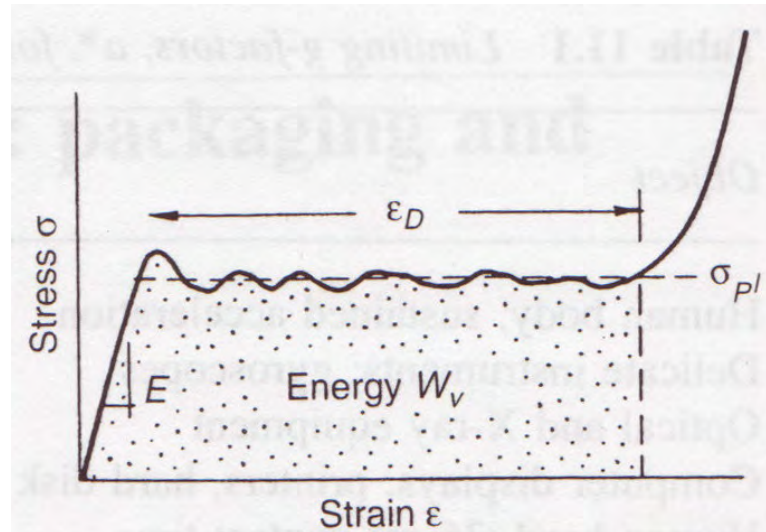


รูปที่ 2.7 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะในอุดมคติ [7]

ในช่วงแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลง เมื่อโฟมโลหะได้รับแรงแบบเส้นตรง เมื่อให้แรงเกินจุดคราก โฟมโลหะจะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงในช่วงบริเวณที่ราบ คือช่วงที่

เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดภายใต้ความเค้นคงที่ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้เป็นลักษณะพิเศษของโฟมโลหะ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานประเภทการดูดซับพลังงาน เมื่อให้แรงอัดกับโฟมโลหะจนโพรงอากาศพังตัวจนหมด ก็จะเข้าสู่ช่วงอัดแน่น เป็นช่วงความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เปรียบเสมือนกับการอัดโฟมโลหะจนกลายเป็นโลหะตัน

ดัดซ้ำแรงกระแทกคือพื้นที่ใต้กราฟในช่วงการเปลี่ยนแปลงในส่วนความสามารถในการดูดซับรูปร่างบริเวณที่ราบ(Plateau)



รูปที่ 2.8 กราฟความเค้น-ความเครียดสำหรับการหาค่าความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก [8]

ซึ่งค่า ϵ_D (Densification Strain) หาได้จากสมการที่ 2.4

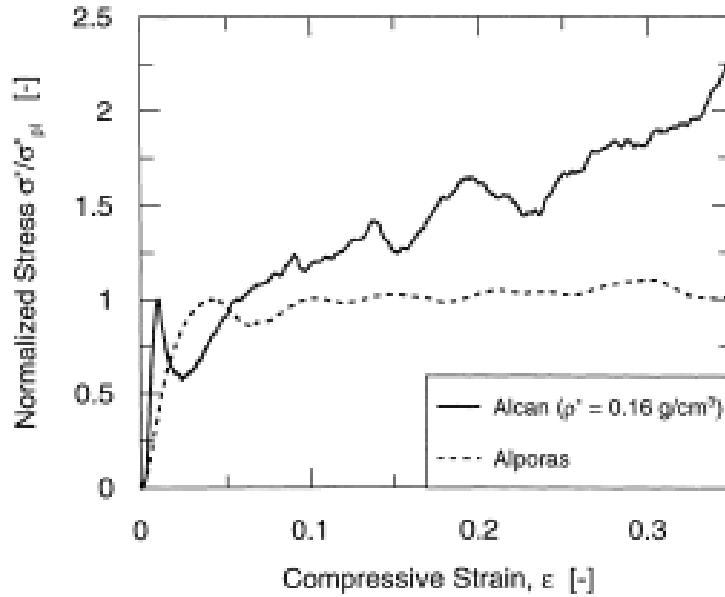
$$\epsilon_D = 0.8 - 1.75(\rho_f / \rho_s) \quad (2.4)$$

โดยที่ ρ_f คือ ความหนาแน่นของโฟมโลหะ

ρ_s คือ ความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ [13]

2.10.1 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มี 3 ขั้นตอนเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ลักษณะกราฟความเค้น-ความเครียด เป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดที่ความหนาแน่น 0.16 g/cm³
[9]

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก และแบบพลาสติกเช่นเดียวกับโลหะทั่วไป จากการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ ได้มีการสร้างสมการเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังแสดงในสมการที่ 2.5

สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงอีลาสติก ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสสัมพัทธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C'_1 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.5)$$

- โดยที่ E^* คือ ค่ามอดูลัสของโฟม
 E_s คือ ค่ามอดูลัสของของแข็ง
 ρ^* คือ ค่าความหนาแน่นของโฟม
 ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
 C_1, C'_1 คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศ
 Φ คือ อัตราส่วนของเนื้อโลหะในก้านโพรงอากาศ [15]

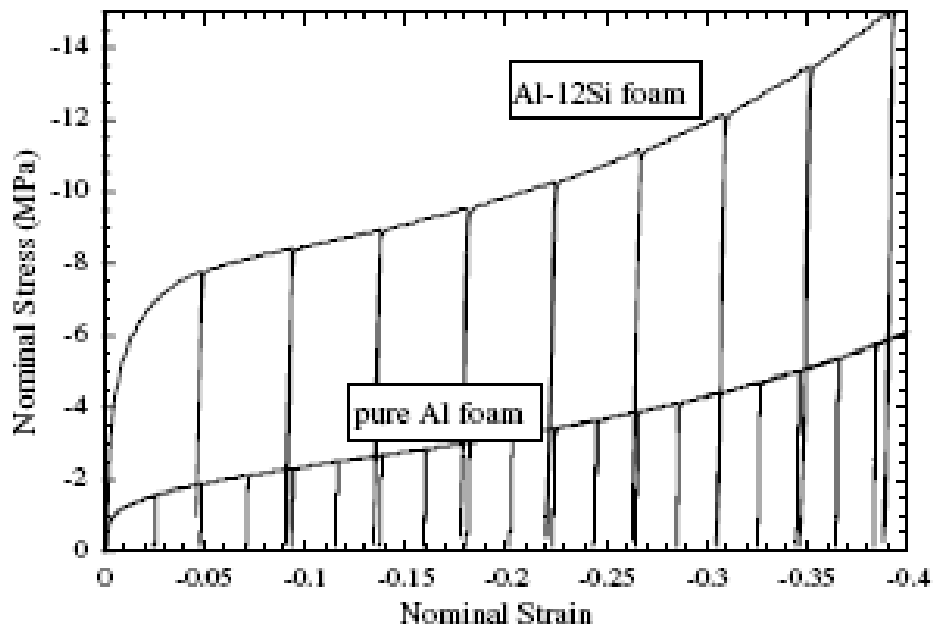
สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลาสติกได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกบริเวณที่ราบ (Plateau stress) ของโฟมกับของแข็งความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \left(\phi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} + C'_2 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.6)$$

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

2.10.2 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิด มีลักษณะที่คล้ายกันกับโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด เป็นไปตามกราฟความเค้นความเครียด ดัง-รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิด โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และโฟม Al-12Si ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.27 [10]

พฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดมีการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก และ แบบพลาสติกเช่นเดียวกับ โครงสร้างแบบปิด สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงอิลาสติก ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส สัมพันธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.7)$$

โดยที่ E^* คือ ค่ามอดุลัสของโฟม
 E_s คือ ค่ามอดุลัสของของแข็ง
 ρ^* คือ ค่าความหนาแน่นของโฟม
 ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
 C_1 คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศซึ่งมีค่าประมาณ 1 [2]

สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลาสติกได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้น ของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกบริเวณที่ราบ (Plateau stress) ของโฟมกับของแข็งและความ หนาแน่นสัมพัทธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.8)$$

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

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

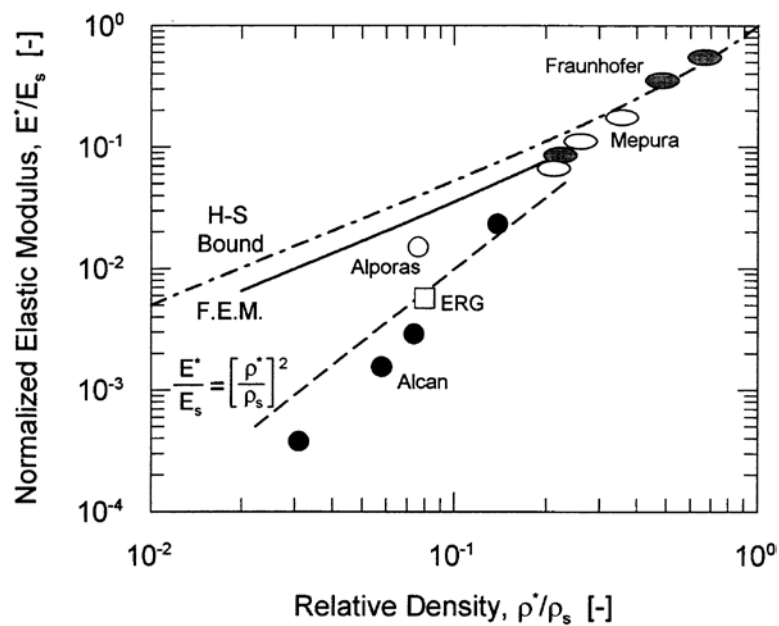
ปัจจัยที่จะกล่าวต่อไปนี้จะเรียงตามลำดับความสำคัญในการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

2.11.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิต

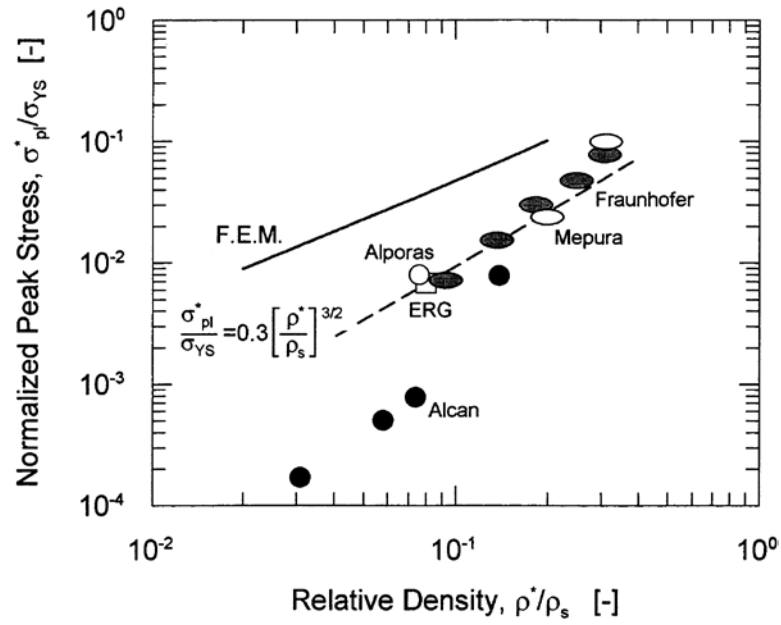
คุณสมบัติของโฟมโลหะนั้น จะขึ้นกับสมบัติของวัสดุที่นำมาผลิต ซึ่งถ้าคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด (Intrinsic Properties) แตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น, ความแข็งแรง ณ จุดคราก, ความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงอัด เป็นต้น คุณสมบัติของโฟมโลหะก็จะต่างกัน

2.11.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์

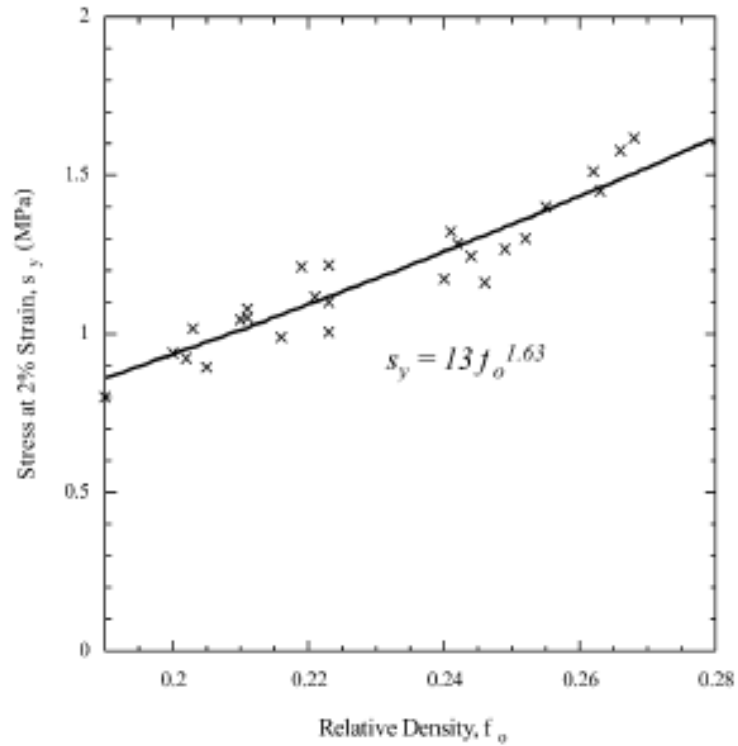
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ มีผลต่อคุณสมบัติทางกลโดยตรง โดยที่คุณสมบัติทางกล เช่น โมดูลัสของยัง, ความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงอัด, ความแข็งแรง ณ จุดคราก สูงขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้น ซึ่งแสดงดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับโมดูลัสของยังหรือโมดูลัสยืดหยุ่น ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas [11]



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความเค้นสูงสุด ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas [11]

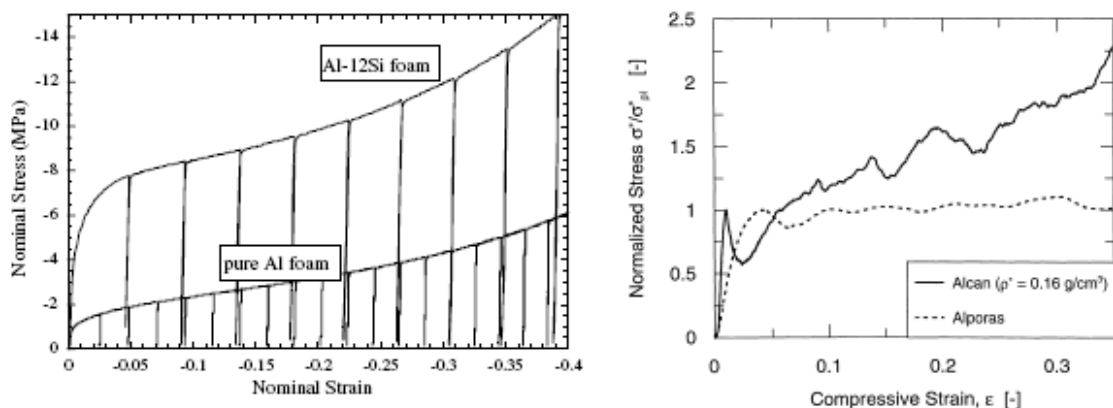


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความแข็งแรง ณ จุดคราก ของโฟมโลหะ [12]

จากกราฟทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น คุณสมบัติทางกลก็จะดีขึ้นตามไปด้วยแต่มีผลเสียคือน้ำหนักของโฟมโลหะก็จะมากขึ้นด้วย

2.11.3 ชนิดโครงสร้างของโฟมโลหะ

โครงสร้างของโฟมโลหะมี 2 แบบคือ โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิดและ โครงสร้างแบบเปิด ความแข็งแรงของโครงสร้างทั้งสองแบบนี้ต่างโดยที่แบบปิดแข็งแรงกว่า เพราะความแข็งแรงต่อหนึ่งโพรงอากาศสูงกว่า เนื่องจากลักษณะของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีลักษณะคล้ายกับมีลูกโป่งอัดอยู่ด้านใน เมื่อให้แรงการที่จะพังได้ก็ต้องอัดลูกโป่งให้แตกก่อน นอกจากนี้ การมีผนังโพรงอากาศในโฟมอะลูมิเนียมยังช่วยรับแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบแรงอัดอัดระหว่าง โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิด และแบบเปิด [9, 10]

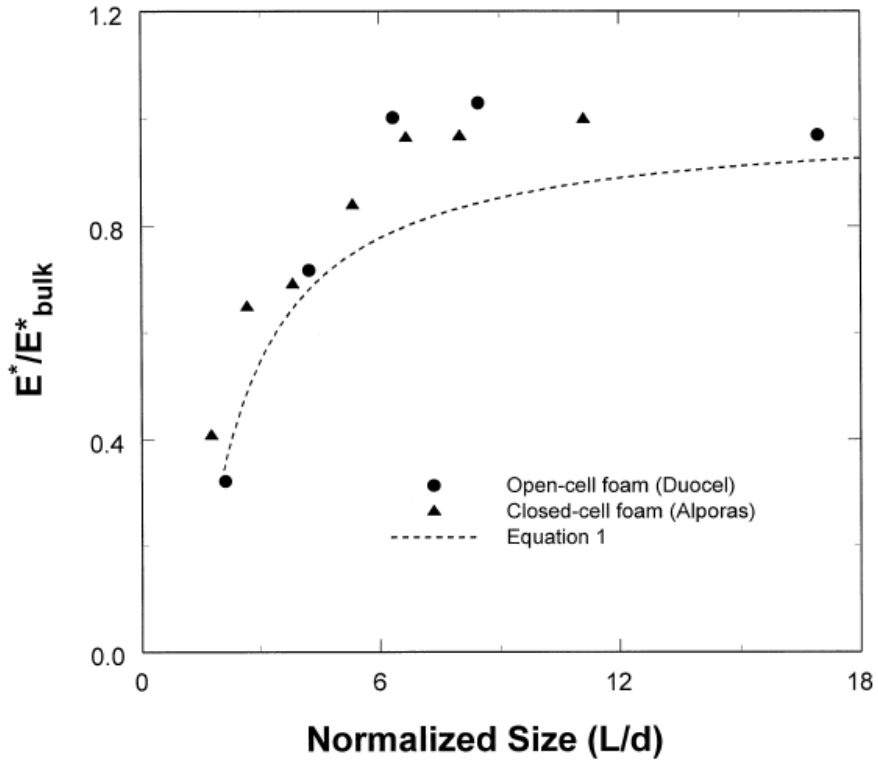
จากกราฟด้านบนจะเห็นได้ว่ากราฟทางซ้ายมือเป็นโฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างแบบเปิด ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และโครงสร้างแบบปิดที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.06 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างแบบปิด มีค่าแรงอัด น้อยกว่าโครงสร้างแบบเปิด เล็กน้อยแต่ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์นั้นน้อยกว่ามาก จึงสรุปได้ว่าโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีความแข็งแรงสูงกว่า และสิ่งที่แตกต่างกันระหว่างทั้งสองกราฟคือ กราฟความเค้น – ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของความเค้นอย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากการที่โพรงอากาศของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดไม่ได้ติดต่อกับโพรงอากาศอื่นๆ จึงเสมือนกับใช้แรงอัดลูกโป่งให้แตก ดังนั้นความเค้นก็จะสูงขึ้นจนถึงจุดที่โพรงอากาศจะพังตัว เมื่อโพรงอากาศพังตัวความเค้นก็จะตกลงอย่างรวดเร็ว เหตุการณ์นี้ก็จะเกิดเป็นวงจรต่อไปจนกระทั่งโพรงอากาศพังตัวหมดทุกโพรง

2.11.4 ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ

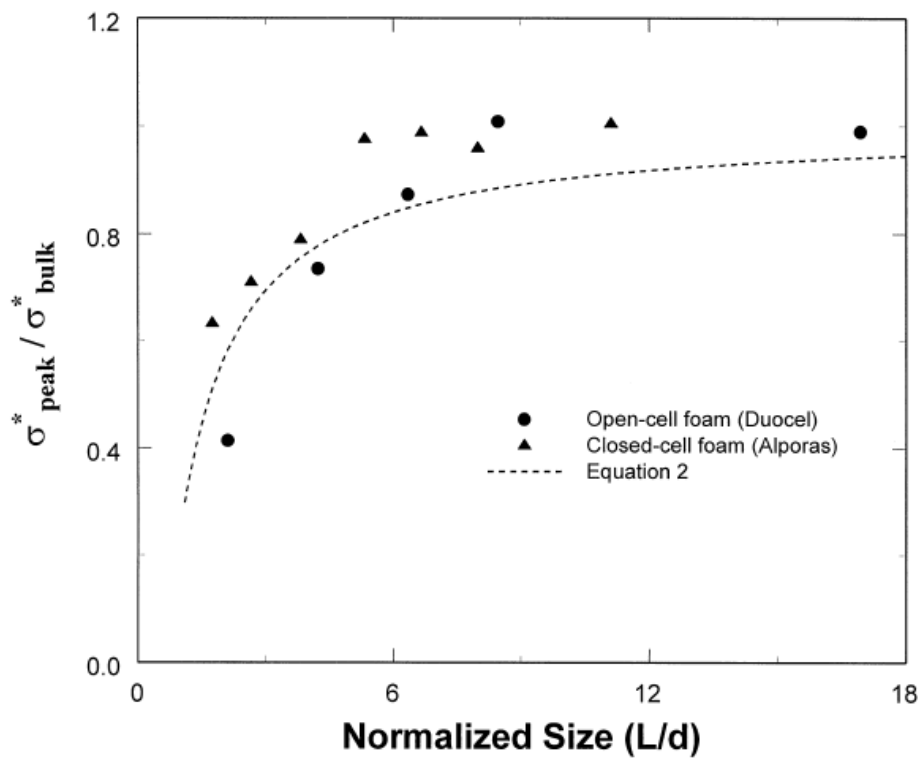
รูปร่างโพรงอากาศที่กลม ขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โฟมโลหะจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุด แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงความหนาแน่นที่เราต้องการผลิต น้ำหนัก และการนำไปใช้งานด้วย เพราะขนาด รูปร่างและการกระจายของโพรงอากาศนั้นสัมพันธ์กันหมด

ขนาดและรูปร่างโพรงอากาศนั้น ส่งผลให้สมบัติทางกลของโฟมโลหะ เช่น ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และ ความแข็งแรง แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า ถ้าความหนาแน่นของโฟมโลหะมีค่าเท่ากัน รูปร่างของโพรงอากาศจะส่งผลต่อความแข็งแรงมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของโพรงอากาศก็ยังเป็นตัวแปรสำคัญอยู่ ส่วนการกระจายตัวของโพรงอากาศนั้น จะส่งผลต่อความสม่ำเสมอของความแข็งแรงในชิ้นงานโฟมโลหะ

ขนาดของโพรงอากาศและปริมาณโพรงอากาศต่อหนึ่งหน่วยความยาวของชิ้นงานทดสอบนั้น ทิศพลเช่นกันซึ่งเรียกว่ามี Size Effects ซึ่งการที่ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องนั้นและคงที่นั้น ขนาดชิ้นงานทดสอบต้องมีสัดส่วนของความยาวหน้าตัดของโฟมและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศ (L/d) มากพอ ถ้าต้องการทดสอบโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด การที่จะทดสอบให้ได้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงของโฟมคงที่ ค่า L/d เท่ากับ 6 และ 5 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.15 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า L/d ของโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6 ส่วนโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดการที่จะทดสอบให้ได้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงของโฟมคงที่ ค่า L/d เท่ากับ 6 และ 8 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.16 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า L/d ของโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8 [13]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสัมพันธ์กับ L/d [13]



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากสัมพันธ์กับ L/d [13]

2.11.5 ตำหนิของโฟมโลหะ (Defects)

ตำหนิของโฟมโลหะนั้นมีหลายแบบ เช่น รอยร้าวและรอยโก่งบนผนังโพรงอากาศ รูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟมโลหะ หรือจะเป็นวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ปลอมปนเข้ามา เมื่อโฟมโลหะได้รับแรง จุดที่อ่อนแอที่สุดคือตำหนิ เป็นจุดที่เกิดการพังตัวได้ง่ายกว่าที่ควรจะเป็น ถ้าตำหนิมีมาก และมีขนาดใหญ่ ความแข็งแรงของโฟมโลหะก็จะต่ำลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. อะลูมิเนียมอินกอตบริสุทธิ์ 99%
2. เศษอะลูมิเนียมผสมจาก บริษัท ไตกิ อะลูมิเนียม อินดัสทรี (ประเทศไทย) จำกัด) เกรด ADC12 (JIS)
3. โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane foams) ขนาดโพรงอากาศ 8 และ 12 ppi
4. เทียน (Wax)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องชั่งน้ำหนักหัวบดกรี
2. เครื่องแปลงไฟเอนกประสงค์ (Dimmer)
3. ฐานยาง สำหรับขึ้นแบบต้นเทียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 นิ้ว
4. แท่นให้ความร้อน (Hotplate)
5. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil)
6. ครอบกเหล็กกล้าปลอดสนิมเจาะรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 นิ้ว
7. เครื่องผสมปูน ยี่ห้อ Old Moon รุ่น IVM 100
8. เครื่องหล่อสุญญากาศ ยี่ห้อ Old Moon รุ่น OMC102
9. เตอบอบกระบอกปูน ยี่ห้อ Old Moon รุ่น BU 450
10. ตู้ฉีดน้ำล้างกระบอกปูน ยี่ห้อ Old Moon รุ่น INC 100
11. เตาหลอมโลหะ (Crucible)
12. เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Hero
13. เตาหลอมโลหะ (Furnace)
14. เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision cutting machine) ยี่ห้อ Buehler รุ่น ISOMET
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
16. กระดาษทราย และ ผงเพชร สำหรับขัดชิ้นงาน
17. Bakelite สำหรับขึ้นรูปตัวเรือน
18. เครื่องขัดชิ้นงาน

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมแบบเทียนสำหรับหล่อ

นำโฟมโพลียูรีเทนมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 55 x 25 x 90 mm หลังจากนั้นหลอมเทียนบนเครื่องให้ความร้อนในแผ่นอะลูมิเนียมบางที่ทำขึ้นเป็นถาดสี่เหลี่ยม นำโฟมโพลียูรีเทนที่ตัดไว้แล้ววางบนเทียนหลอมเหลว หลังจากเย็นตัวแล้ว ได้เป็นโฟมโพลียูรีเทนที่มีฐานเป็นเทียน จากนั้นจึงนำส่วนนี้ไปติดเป็นต้นเทียนซึ่งมีฐานเป็นยาง โดยใช้หัวบัตรกริในการติดเทียนให้มีลักษณะคล้ายต้นไม้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ต้นเทียนที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิต

3.3.2 การเตรียมวัสดุผสมเนื้อฟีนอะลูมิเนียม

เศษอะลูมิเนียมผสมที่จะผลิตนั้นมีสัดส่วนของเศษอะลูมิเนียมเท่ากับ 0, 10, 30, และ 50 wt.% โดยวิธีการแรก คือ นำแท่งอะลูมิเนียมอินกอต ตัดให้มีขนาดพอที่จะใส่ลงในเบ้าหลอมโลหะซึ่งทำการหลอมด้วยเตาหลอมที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงใส่เศษอะลูมิเนียมที่ห่อด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอล์ยลงไป หลังจากนั้นทำการกวนด้วยมือทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงจุ่มในน้ำทันที

3.3.3 การเตรียมอะลูมิเนียมก่อนการทำการหล่อ

ก่อนทำการหล่อต้องเตรียมอะลูมิเนียมให้พอกับการหล่อแต่ละครั้ง ในการคำนวณจะคำนวณน้ำหนักของอะลูมิเนียมที่ต้องใช้ ชั้นแรกชั่งน้ำหนักฐานยาง และวัดปริมาตรบริเวณโคนที่มีลักษณะเป็นกรวย หลังจากเตรียมแบบเทียนเรียบร้อยแล้วให้นำมาชั่งน้ำหนักแล้วหาน้ำหนักของส่วนที่เป็น

แบบ โดยนำน้ำหนักแบบเทียบทั้งหมดลบด้วยน้ำหนักฐานยาง เนื่องจากเทียบมีความหนาแน่น โดยประมาณเท่ากับน้ำซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 g/cm^3 เพราะฉะนั้นจึงนำผลลัพธ์ส่วนนี้ไป รวมกับปริมาตรกรวยตรงโคนฐานยาง ก็จะได้เป็นปริมาตรอะลูมิเนียมที่จะต้องใช้ทั้งหมด คำนวณเป็น น้ำหนักตามสมการที่ 3.1

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

โดยที่ ρ = ความหนาแน่น (g/cm^3)

m = มวล (g)

v = ปริมาตร (cm^3)

โดยที่ความหนาแน่นของอะลูมิเนียมมีค่า 2.70 g/cm^3 แต่ควรเผื่อปริมาณของอะลูมิเนียมที่จะใช้จากปริมาตรที่คำนวณได้ประมาณ 10%

3.3.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

ขั้นตอนแรก คือการนำเอาโลหะอะลูมิเนียมอินกอตมาผสมกับเศษโลหะอะลูมิเนียมในแต่ละเกรดเท่ากับ 0, 10, 30 และ 50 wt.% ตามลำดับ และในแต่ละอัตราส่วนผสมจะใช้โฟมโพลียูรีเทนอัตราส่วนละ 2 ขนาด คือ โฟมโพลียูรีเทนขนาด 8 และ 12 ppi เมื่อผสมเสร็จแล้ว จะนำมาทำการหล่อ โดยเริ่มแรกเครื่องจะทำการดูดอากาศออกเพื่อให้เกิดสภาวะสุญญากาศและทำให้เกิดแรงดันประมาณ 1 Bar เป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการหลอมอะลูมิเนียมที่ 1200°C เมื่ออะลูมิเนียมหลอมหมด เครื่องจะทำการเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงไปแบบป้อน โดยจะเทลงมาก่อนเป็นเวลา 2.5 วินาที แล้วจึงทำไม่ให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดการกระจาย ไม่ลงแบบ การอัดแรงดันจะการอัดแรงดันเพื่อทำที่ความดัน 1.2 Bar โดยจะเข้าไปพร้อมๆ กับการดูดอากาศ ซึ่งจะทำเป็นเวลา 300 วินาที จึงนำแบบป้อนที่ทำการหล่อแล้วออกจากเครื่อง ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงทำลายแบบป้อนด้วยการแช่น้ำ หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกมาล้างเศษปูนออก แล้วเป่าให้แห้ง

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม

3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานจะเตรียมไว้ แบบคือ แบบแรกทำการตัดโฟมอะลูมิเนียมขนาด $21 \times 1 \times 1 \text{ cm}$ ด้วยเครื่อง Precision cutting machine ส่วนอีกแบบหนึ่งทำเช่นเดียวกันกับแบบแรก นำชิ้นงานที่ตัดไว้แล้วไปทำการขึ้นรูปตัวเรือนแบบร้อน โดยใช้ Bakelite หลังจากนั้นนำไปทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 400, 600, 800, 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6, 3 และ $1 \mu\text{m}$

3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปตัวเรือนมาตรวจสอบโครงสร้างของโพลีอะลูมิเนียม โดยทำการตรวจสอบบริเวณโครงข่ายของเนื้อพอลิอะลูมิเนียม, บริเวณขอบมุม และจุดเชื่อมต่อของโครงข่ายอะลูมิเนียมแต่ละเส้น และตรวจสอบดูเนื้ออะลูมิเนียมเพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคตัวเสริมแรง

3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดขนาด $1 \times 1 \times 1$ cm มาตรวจสอบด้วย SEM โดยที่การตรวจสอบจะเริ่มจากการตรวจสอบโครงสร้างโดยทั่วไปจากกำลังขยายต่ำไปสูง เพื่อตรวจสอบบริเวณที่เป็นโครงข่ายของเนื้อพอลิอะลูมิเนียม, บริเวณขอบมุม และจุดเชื่อมต่อของโครงข่ายอะลูมิเนียมแต่ละเส้น

3.5 การทดสอบสมบัติทางกล

3.5.1 การทดสอบแรงอัด

นำโพลีอะลูมิเนียมที่ได้ ตัดด้วยเครื่อง Precision cutting machine ให้มีขนาด $20 \times 20 \times 20$ mm นำไปทดสอบการรับแรงอัด โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 0.6 mm/min เมื่อได้กราฟความเค้นความเครียดจากผลการทดสอบแรงอัด สามารถหาค่าความแข็งแรง ณ จุดครากได้โดยลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกที่เป็นเส้นตรง ให้ตัดแกนที่ 0.2% ของค่าความเครียด ซึ่งจุดที่เส้นขนานตัดกับกราฟความเค้นความเครียดคือความแข็งแรง ณ จุดคราก

3.5.2 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่ตัดแล้วไปขัดให้มีความละเอียดระดับ $1 \mu\text{m}$ และนำไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง HM-100 Mitutoyo microhardness tester โดยทำการกดอย่างน้อย 5 ตำแหน่งในแต่ละชิ้นงานทดสอบ และนำค่าความแข็งที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 คุณลักษณะของเศษโลหะอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.1 แสดง



รูปที่ 4.1 ลักษณะเศษโลหะอะลูมิเนียมเกรด ADC12

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด ADC12

| Material | Chemical composition (wt.%) | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------------------------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | Mg | Si | P | S | V | Ti | Cr | Mn | Fe | Ni | Cu | Zn | Al |
| ADC12 | <0.01 | 14.77 | 0.05 | 0.35 | <0.01 | 0.11 | 0.10 | 0.73 | 2.02 | 0.22 | 4.17 | 1.65 | Bal |

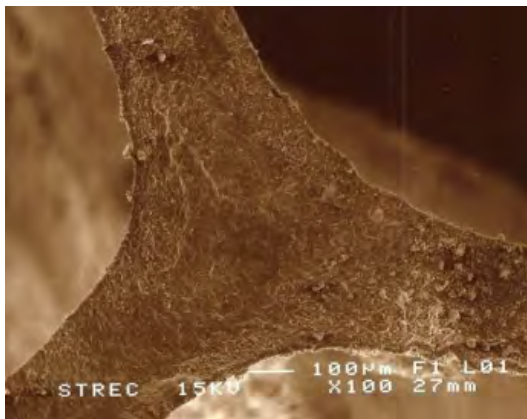
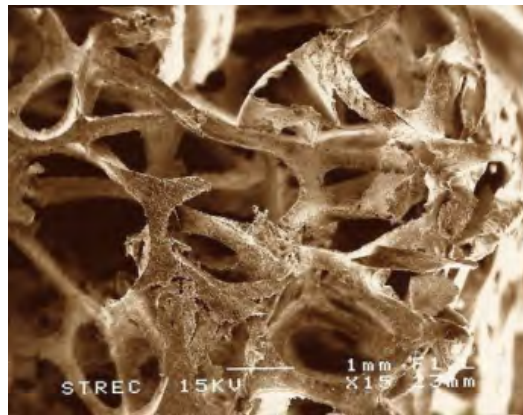
4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม

4.2.1 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

4.2.1.1 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์โพรงอากาศขนาด 8 ppi

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างที่เกิดจากต้นแบบที่ทำจากโฟมโพลีสไตรีนขนาด 8 ppi จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กมีลักษณะที่

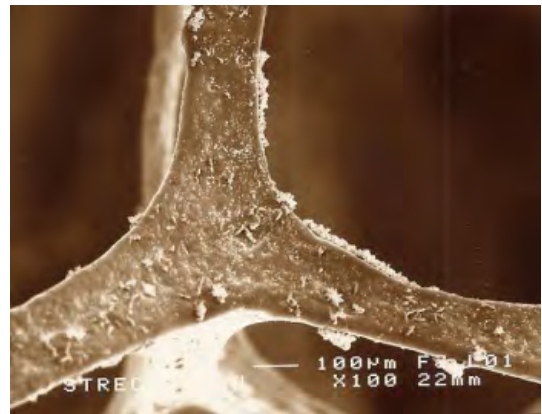
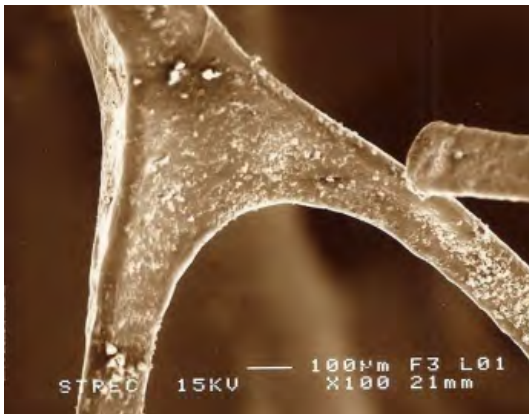
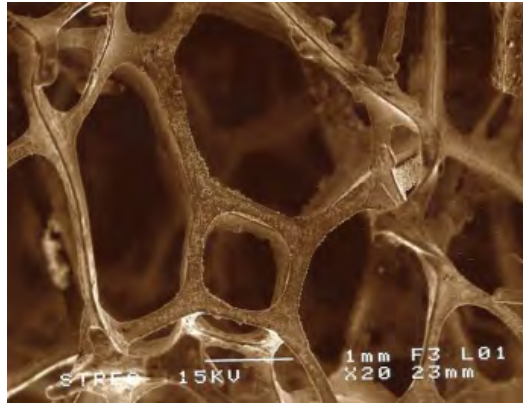
ค่อนข้างสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตก และโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ โดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบ และยังพบว่า มีเศษปูนขนาดเล็กติดอยู่บนผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi

4.2.1.2 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์โพรงอากาศขนาด 12 ppi

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกับโฟมโพลียูรีเทนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก (12 ppi) และโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ โดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบ ขอบของโพรงอากาศมีลักษณะไม่เรียบ และยังมีเศษปูนติดอยู่

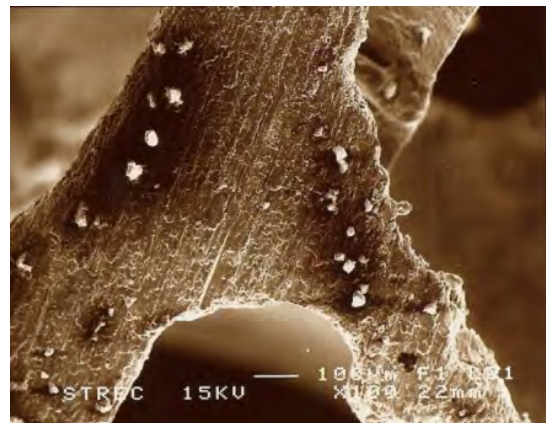
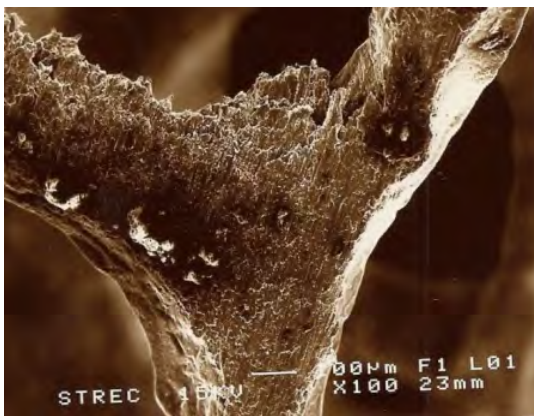
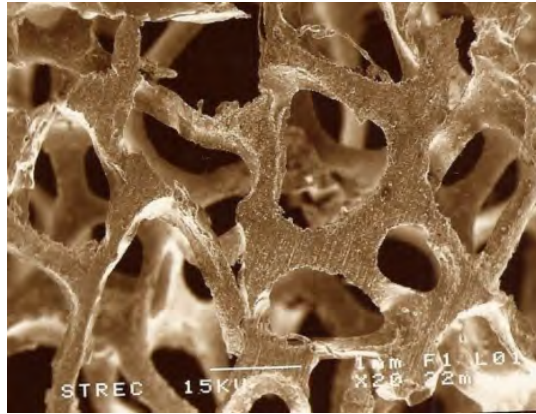


รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่

4.2.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi

4.2.2.1 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.%

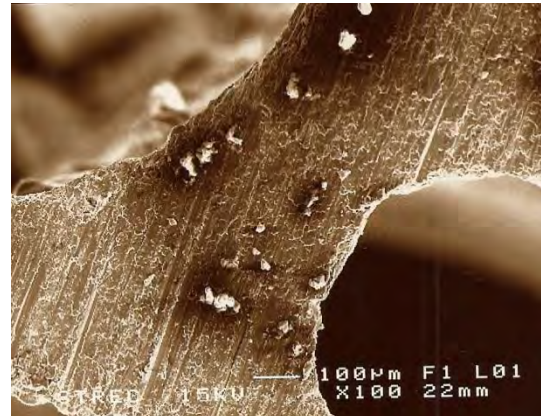
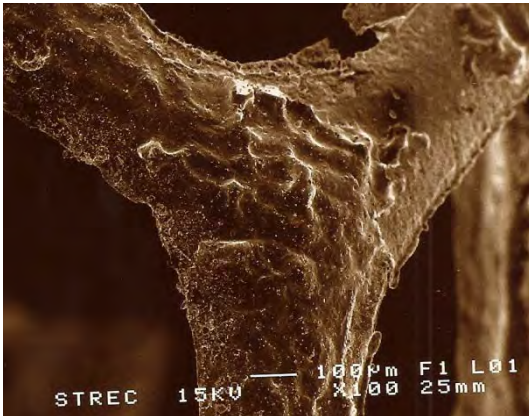
รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะต่างกับโครงสร้างที่เกิดจากโฟมโพลียูรีเทน จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะค่อนข้างสมบูรณ์ แต่มีตำหนิเป็นร่องรูขนาดกลางและขนาดเล็กที่บริเวณโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม และโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ โดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบ ขอบของผิวไม่เรียบ มีลักษณะเหมือนรอยฉีกขาด มีตำหนิเป็นรอยเส้นตรงทั่วทั้งผิวของโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi

4.2.2.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.%

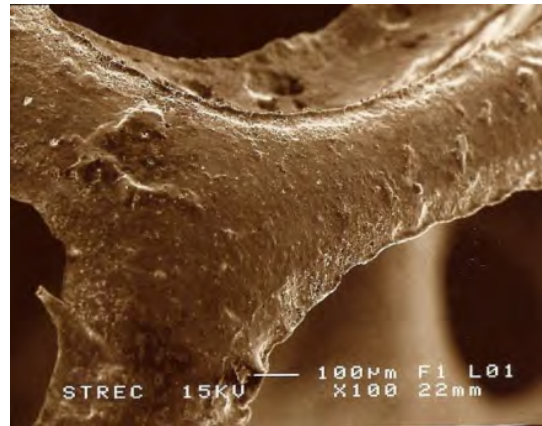
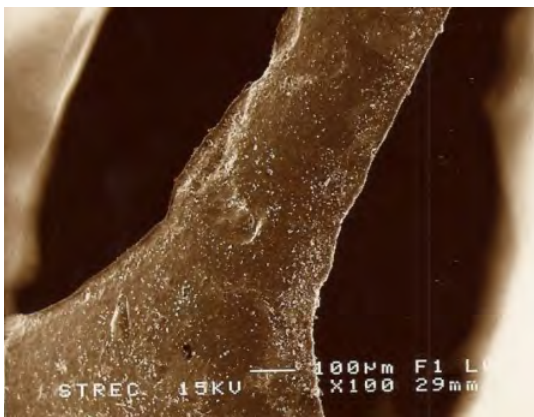
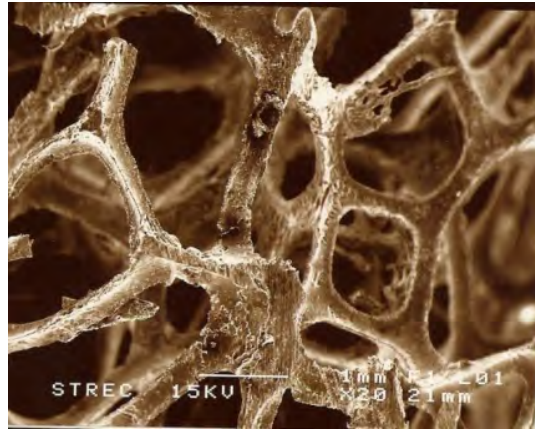
รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะต่างกับโครงสร้างที่เกิดจากโฟมโพลียูรีเทน จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก แต่มีตำหนิเป็นร่องขนาดกลางและขนาดเล็ก, มีรอยแตกที่บริเวณโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม และโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ โดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบขอบของผิวไม่เรียบ และมีตำหนิเป็นรอยเส้นตรงทั่วทั้งผิวของโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi

4.2.2.3 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.%

รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะต่างกับโครงสร้างที่เกิดจากโฟมโพลียูรีเทน จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi แต่มีตำหนิเป็นร่องรูขนาดเล็กและมีรอยแตกทั่วทั้งบริเวณโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม โพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ ความโค้งงอของโพรงอากาศมีลักษณะเป็นคลื่นโดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบ ขอบของผิวไม่เรียบ รอยย่นที่ผนังของโพรงอากาศ

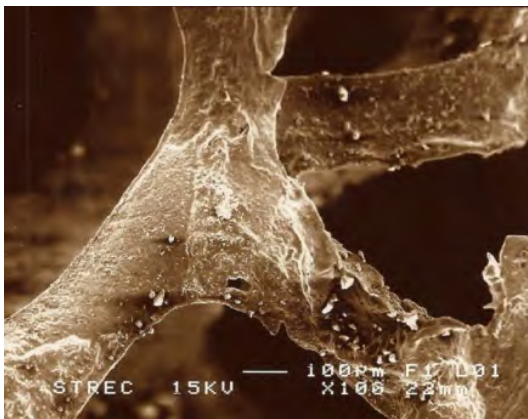


รูปที่ 4.6 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi

4.2.3 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi

4.2.3.1 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.%

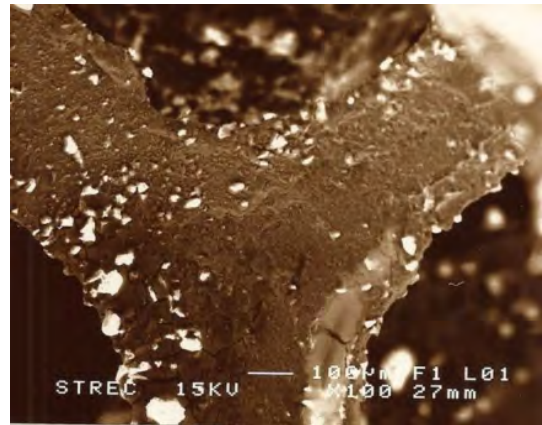
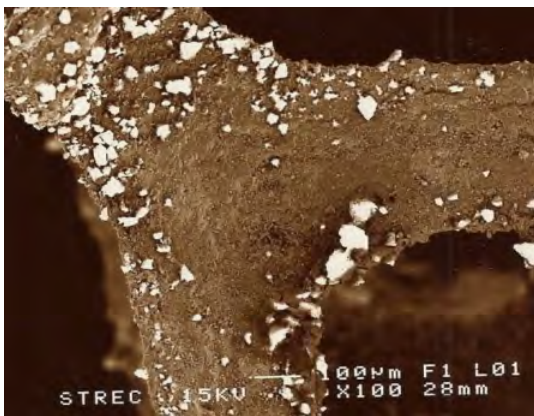
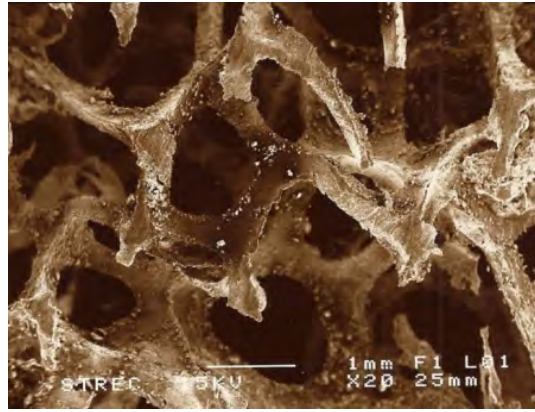
รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะต่างกับโครงสร้างที่เกิดจากโฟมโพลียูรีเทน จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะค่อนข้างสมบูรณ์ แต่มีตำหนิเป็นร่องรูขนาดเล็ก มีรอยแตกทั่วทั้งบริเวณโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม และโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ โดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบ ผนังของโพรงอากาศเป็นรอยย่น มีการบิดเบี้ยวของผนังโพรงอากาศ ขอบของผิวมีรอยแตกและไม่เรียบ และยังมีเศษปูนติดอยู่ และมีเศษปูนติดอยู่มาก



รูปที่ 4.7 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi

4.2.3.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.%

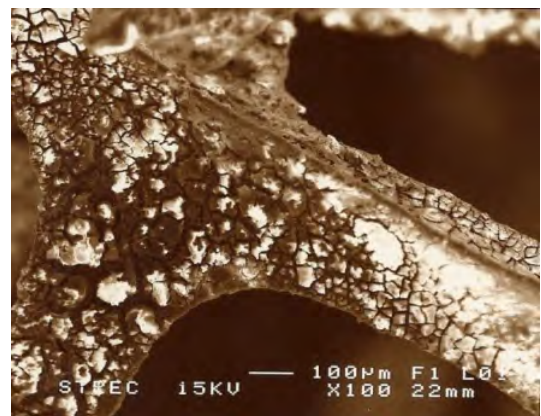
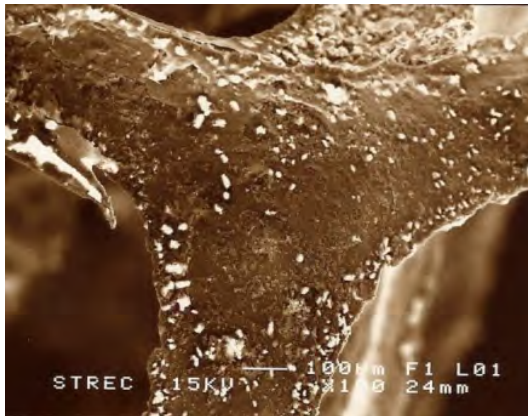
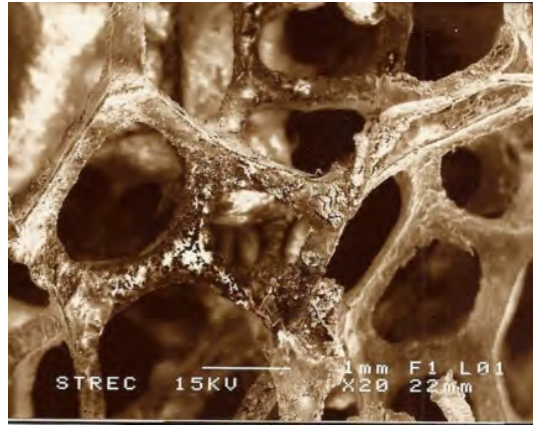
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะต่างกับโครงสร้างที่เกิดจากโฟมโพลียูรีเทน จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 10 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ แต่มีดำหนิเป็นร่องรูขนาดเล็กทั่วทั้งบริเวณโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม และโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ โดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบ ขอบของผิวไม่เรียบ และมีเศษปูนติดอยู่มาก



รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 30 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi

4.2.3.3 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.%

รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi โดยโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะต่างกับโครงสร้างที่เกิดจากโฟมโพลียูรีเทน จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะค่อนข้างสมบูรณ์ แต่มีตำหนิเป็นร่องรูขนาดเล็กและขนาดกลาง มีรอยแตกทั่วทั้งบริเวณโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม ความโค้งของโพรงอากาศลักษณะเป็นคลื่น และโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะเต็มแบบ โดยที่บริเวณผิวของโพรงอากาศมีลักษณะหยาบ ขอบของผิวไม่เรียบ และยังมีเศษปูนติดอยู่มาก



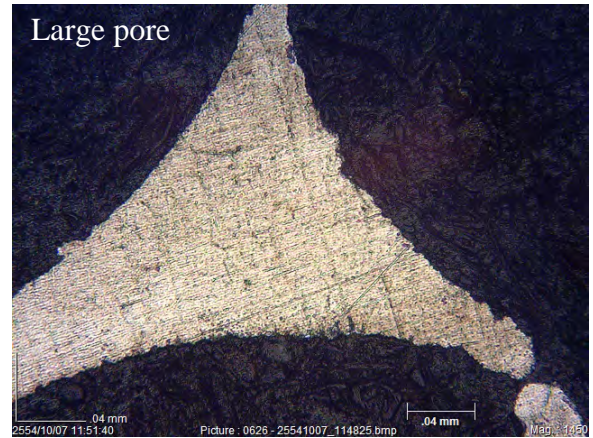
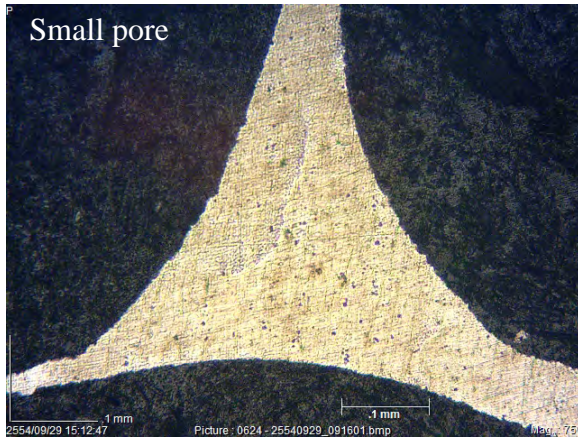
รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณ 50 wt.% ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi

จากผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่าการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมด้วยเศษอะลูมิเนียมที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ กันถึง 50 wt.% นั้นเป็นไปได้ และโครงสร้างของโฟมที่ได้ก็มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างของต้นแบบที่ทำจากโฟมโพลียูรีเทน

4.3 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

4.3.1 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 และ 12 ppi จะเห็นได้ว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทั้งสองขนาด โพรงอากาศมีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกัน นั่นคือไม่ปรากฏเฟสที่สองในเนื้อพื้นโลหะ

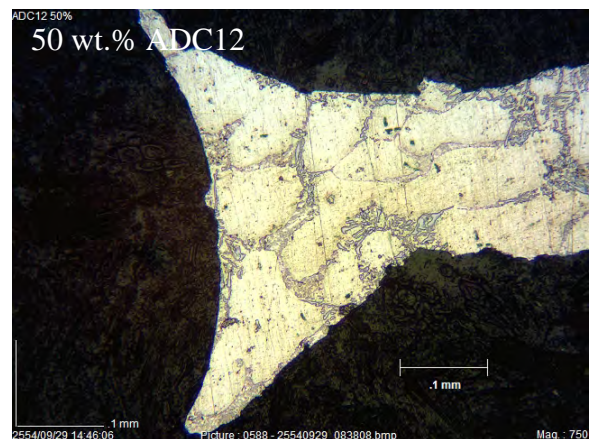
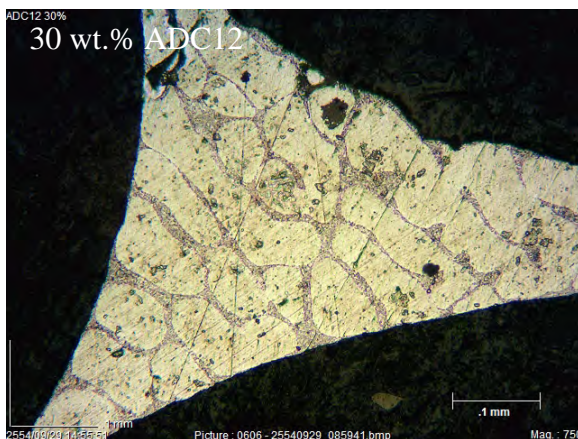
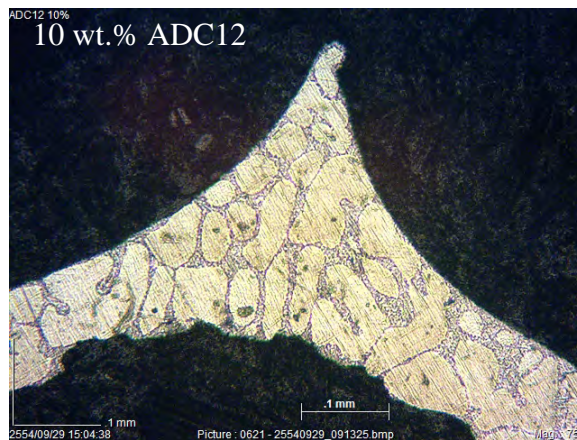


รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 และ 12 ppi

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12

4.3.2.1 โฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศขนาด 8 ppi

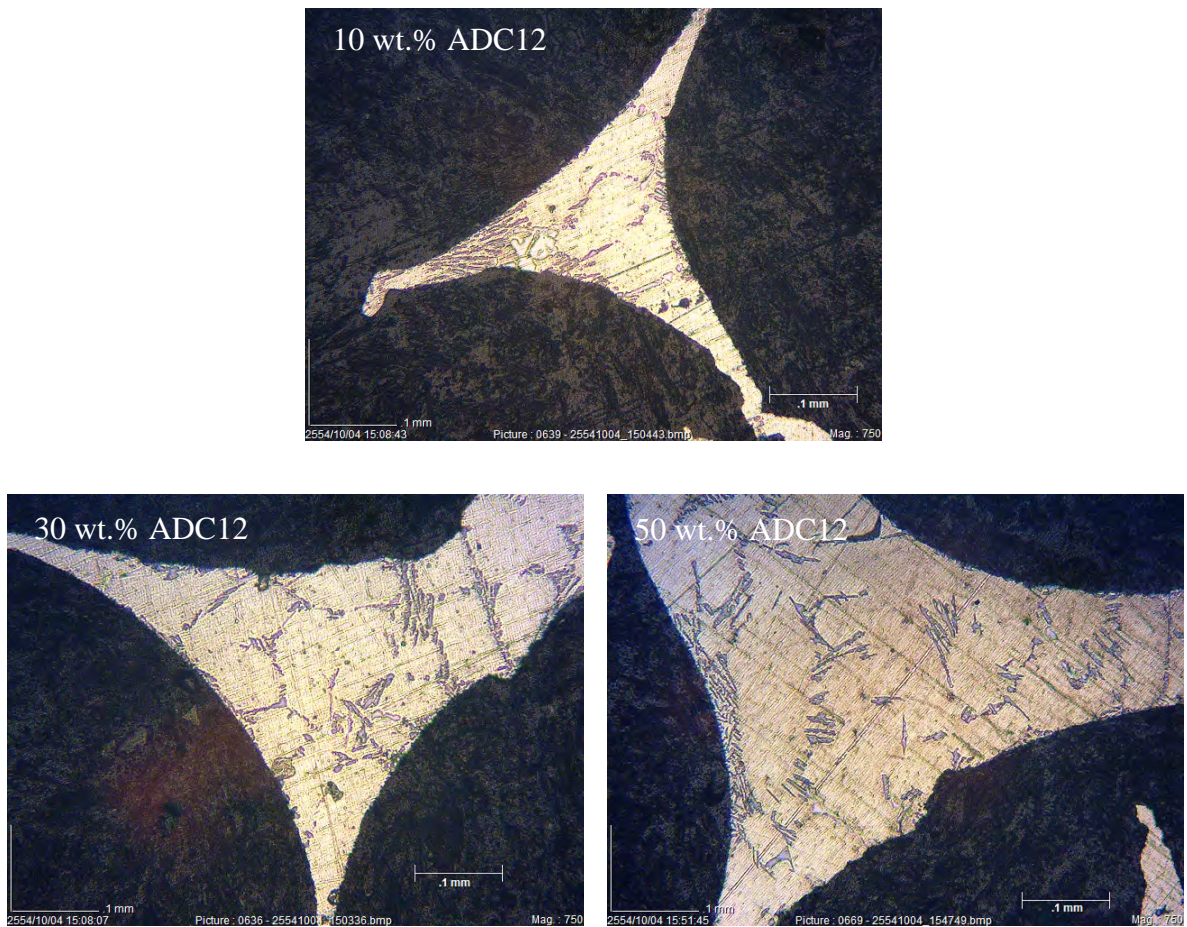
รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi ที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณต่างๆ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมทุกส่วนผสมมีโครงสร้างแบบ Dendrite และมี Eutectic Si ชนิด Acicular ปรากฏอยู่



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi ที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณต่างๆ

4.3.2.2 โฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศขนาด 12 ppi

รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi ที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณต่างๆ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมทุกส่วนผสมมีโครงสร้างแบบ Dendrite ที่คล้ายกับโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ในปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณซิลิกอนจริงในแต่ละอัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมในโฟมอะลูมิเนียมซึ่งหาได้จากกฎการผสม (Rule of mixture) โดยอัตราส่วนผสมที่ 50 wt.% ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่มากที่สุดมีปริมาณ Si ผสมอยู่จริงคิดเป็น 6.0 Wt.%

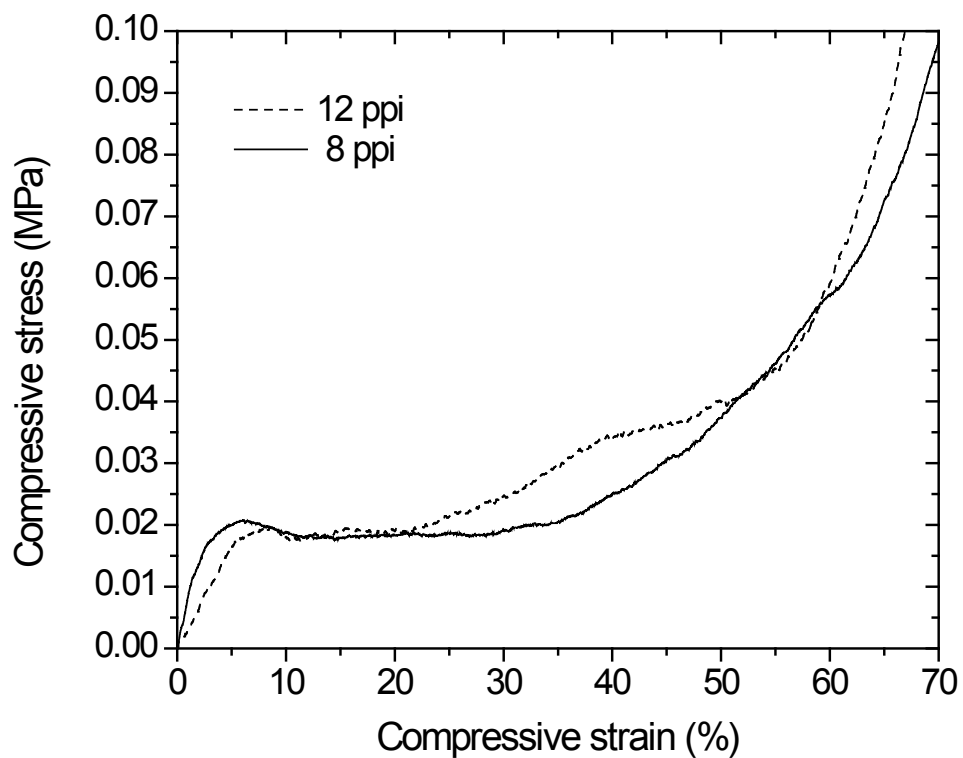
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณซิลิกอนในแต่ละอัตราส่วนผสม

| ส่วนผสม | อัตราส่วนผสม | Si (wt.%) |
|---------|--------------|-----------|
| ADC12 | 0 wt.% | 0 % |
| | 10 wt.% | 1.2 % |
| | 30 wt.% | 3.6 % |
| | 50 wt.% | 6.0 % |

4.4 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

4.4.1 ความแข็งแรงอัด

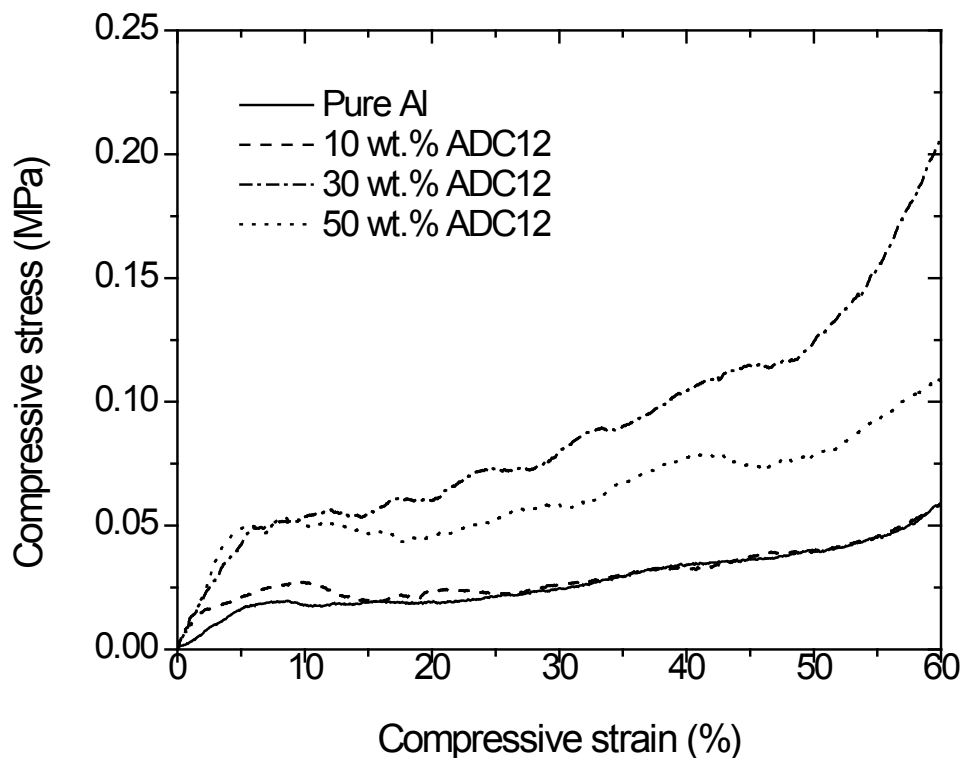
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 และ 12 ppi จะเห็นได้ว่ากราฟความเค้นความเครียดของโฟมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงยืดหยุ่น (Elastic region) และช่วงความเค้นคงที่ (Plateau region) และช่วงสุดท้ายซึ่งเป็นช่วงอัดแน่น (Densification region) กราฟของโฟมที่ได้มีลักษณะคล้ายกับกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุพูนทั่วไป



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 และ 12 ppi

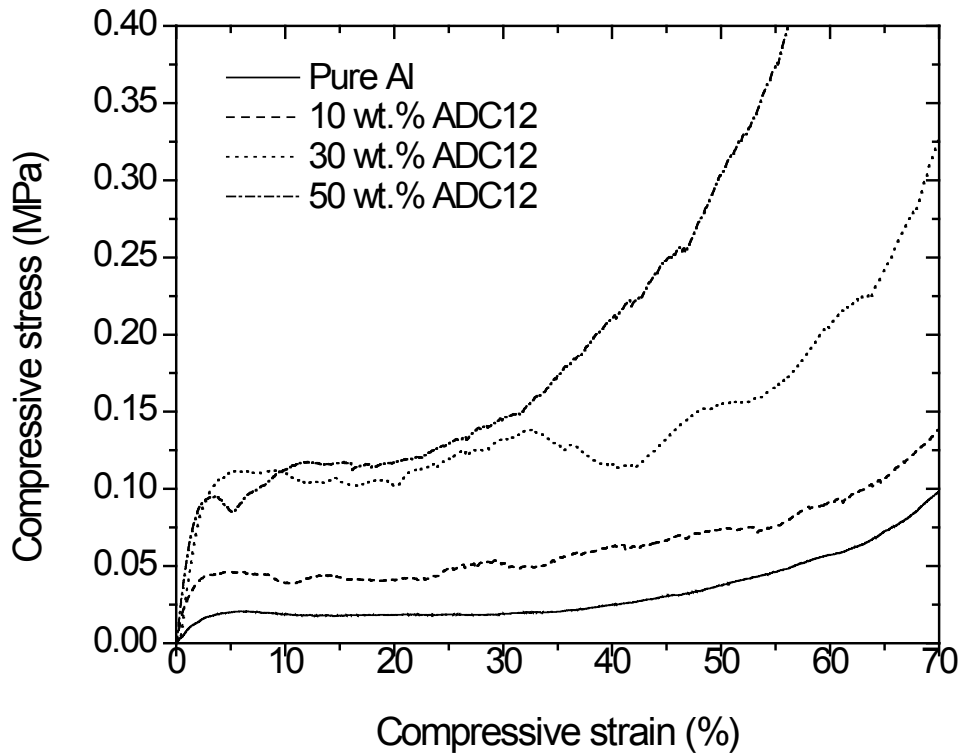
จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟทั้งสองจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยโพลีอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่กว่าจะมีความแข็งแรงจุดครากสูงกว่าโพลีที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขนาดของโพรงอากาศที่ไม่ต่างกันมาก ทำให้ความแตกต่างในความแข็งแรงของโพลีมีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีขนาดโพรงอากาศขนาด 8 ppi จะเห็นได้ว่าความเค้นอัดของโพลีมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสม 50 wt.% โพลีจะมีความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีขนาดโพรงอากาศขนาด 8 ppi ในแต่ละอัตราส่วนของเศษอะลูมิเนียมที่ผสม

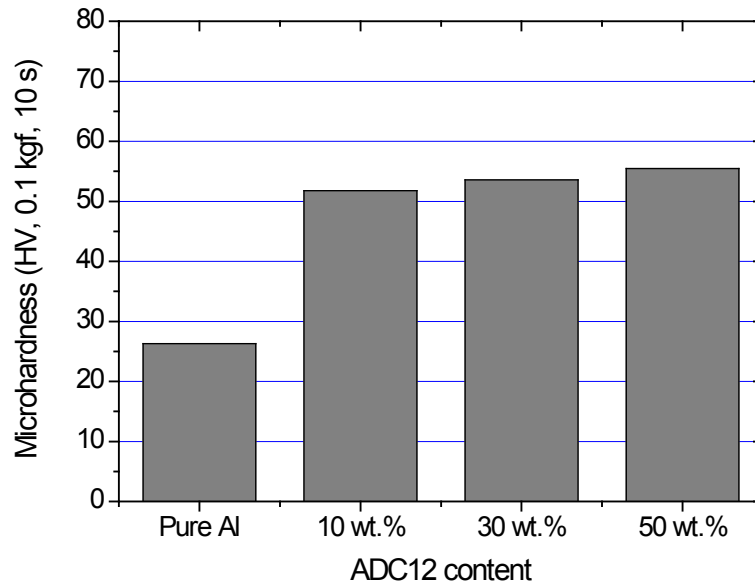
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีขนาดโพรงอากาศขนาด 12 ppi จะเห็นได้ว่าความเค้นอัดของโพลีมีการเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีของโพลีที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi อย่างไรก็ตาม โพลีที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่ามีขนาดการเพิ่มขึ้นของความเค้นอัดสูงกว่ามาก



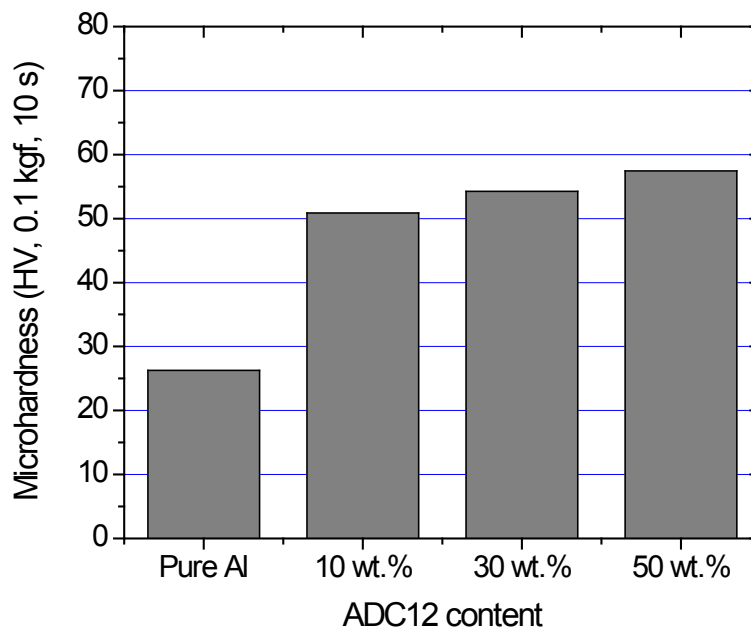
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมผสมกับ เศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีขนาดโพรงอากาศขนาด 12 ppi ในแต่ละอัตราส่วนของเศษ อะลูมิเนียมที่ผสม

4.4.2 ความแข็ง

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงกราฟความแข็งที่ผิวของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาด 8 และ 12 ppi ที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความแข็งของโฟมทั้งสอง ชนิดมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยโฟมที่มีอัตราส่วนผสมสูงสุดที่ 50 wt% จะมีความแข็งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของโฟมอะลูมิเนียมทั้งสองขนาดโพรงอากาศ พบว่าความแข็งของโฟมที่อัตราส่วนผสมเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.16 กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi



รูปที่ 4.17 กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ในการทำการวิจัยเบื้องต้นในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้ความดันที่อุณหภูมิการหล่อต่างๆ กันเพื่อที่จะหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการหล่อสำหรับทั้งโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมจากการทดลองพบว่า ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ด้วยวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้ความดันที่มีโครงสร้างสมบูรณ์เหมือนกับต้นแบบที่ทำจากโฟมพอลิเมอร์ จะใช้อุณหภูมิในการฉีดโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ต่ำกว่าการฉีดโฟมอะลูมิเนียมผสมเศษโลหะอะลูมิเนียมในแต่ละอัตราส่วนผสมต่างๆ กัน การหลอมเหลวที่ยากขึ้นของโฟมอะลูมิเนียมผสมเศษโลหะอะลูมิเนียมเกิดขึ้นเนื่องจากเศษโลหะอะลูมิเนียมผสม ADC12 มีปริมาณออกไซด์ปนเปื้อนมากกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เนื่องจากเศษอะลูมิเนียมมีพื้นที่ผิวมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทำให้มีความยากมากกว่าในการหลอม ถึงแม้ว่าเศษโลหะอะลูมิเนียมผสมจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าก็ตาม ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับโฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียม จึงใช้อุณหภูมิการผลิตเดียวกันที่ $1,200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้ชิ้นงานทั้งสองชนิดหลอมเหลวได้หมด

จากการผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีขนาดโพรงอากาศแตกต่างกันพบว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่สามารถฉีดน้ำโลหะเข้าได้เต็มแบบได้ดีกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก ซึ่งผลที่ได้นี้เกิดจากต้นแบบโฟมโพลียูรีเทนที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่กว่าโฟมโพลียูรีเทนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก ทำให้มี Threshold pressure ต่ำกว่า [14] ซึ่งเมื่อเวลาฉีดน้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าไปจึงสามารถทำได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์นี้จะมีลักษณะที่ค่อนข้างสมบูรณ์ใกล้เคียงกับโครงสร้างมหภาคที่ได้จากโฟมโพลียูรีเทน เมื่อทำการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคพบว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน สะอาด ไม่มีสิ่งเจือปน เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ไม่มีธาตุผสมและไม่มีสิ่งปนเปื้อนใดๆ

ในการตรวจวัดความสามารถในการรับแรงอัดนั้นโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยที่สุดเพราะเนื่องมาจากที่ไม่มีธาตุผสม เช่น Si ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อพื้นโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ส่วนความสามารถในการดูดซับพลังงานนั้นโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานได้น้อยที่สุด เพราะมีพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดน้อย ถึงแม้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีขนาดโพรงอากาศแตกต่างกันนี้จะมี ความแข็งแรงจุดครากที่แตกต่างกัน แต่ผลที่ได้ไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาจากกราฟความเค้น ความเครียดก็จะเห็นได้ว่าโฟมทั้งสองมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันตลอดช่วงความเครียด ดังนั้นความแตกต่างระหว่างขนาดโพรงอากาศของโฟมทั้งสองที่ 8 และ 12 ppi จึงไม่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของโฟม

5.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12

ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ด้วยวิธีการหล่อแบบแทรกซึมโดยใช้ความดัน จะใช้อุณหภูมิในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างสมบูรณ์สูงกว่าอุณหภูมิการผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และยังเมื่อผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 เพิ่มขึ้น ก็ยังจะต้องใช้อุณหภูมิในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมชนิดนี้เพิ่มขึ้นอีกด้วย เนื่องจากเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่นำมาผสมนั้นมีขนาดเล็กและมีรูปร่างม้วนเป็นขด ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตด้วยเครื่องกลึง จึงมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ ทำให้มีออกไซด์ (Al_2O_3) หรืออลูมินาปกคลุมที่ผิวของเศษอะลูมิเนียมจำนวนมาก อลูมินามีจุดหลอมเหลวที่สูง เพราะฉะนั้นเวลาหลอมชิ้นงาน อนุภาคออกไซด์ในเศษอะลูมิเนียมจึงไม่ได้หลอมเหลวไปด้วย และจะไปยึดโครงสร้างของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมไว้ ทำให้การหลอมเหลวเป็นไปได้ยาก ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิและเวลาในการหลอมเพิ่มขึ้น

ในการตรวจสอบโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมที่มีปริมาณเศษอะลูมิเนียมผสมอยู่เท่ากัน โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่จะผลิตให้เต็มแบบหรือมีโครงสร้างสมบูรณ์ได้ง่ายกว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่มีโพรงอากาศขนาดเล็ก ซึ่งเป็นผลจากการมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของก้านโพรงอากาศที่ใหญ่กว่าทำให้มี Threshold pressure ที่ต่ำกว่า เช่นเดียวกับกรณีของการผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบการผลิตโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีโพรงอากาศขนาดเดียวกัน โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมก็จะผลิตได้ยากกว่า ซึ่งเป็นผลจากการปนเปื้อนของอนุภาคออกไซด์ในน้ำโลหะ นอกจากนี้ การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมที่มีขนาดโพรงอากาศเล็กกว่ายังได้รับผลจากอนุภาคออกไซด์ที่ปนเปื้อนในน้ำโลหะมากกว่า อนุภาคออกไซด์ที่อยู่ในน้ำโลหะจะทำให้มีน้ำโลหะมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการไหลของน้ำโลหะลดลง ทำให้ต้องใช้ความดันในการหล่อเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่าจึงทำได้ยากกว่า

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สำหรับทุกๆ กรณีของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียม พบว่าโฟมจะมีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกัน นั่นคือมีโครงสร้างแบบ Dendrite ของ Al-Si ที่มีโครงสร้าง Eutectic ของ Si ซึ่งมีลักษณะคล้ายเข็ม (Acicular) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 การผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ซึ่งมีปริมาณ Si เท่ากับ 14.77 wt.% กับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทำให้ Si จากเศษอะลูมิเนียมแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เมื่อหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้มีโครงสร้างจุลภาคแบบ Eutectic เช่นเดียวกันถึงแม้ว่าจะมีปริมาณ Si ผสมอยู่เพียงเล็กน้อยก็ตาม นอกจากนี้ ปริมาณ Si ที่มีอยู่จริงในชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม ดังแสดงในตาราง 4.2 ก็แตกต่างกันไปตามอัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งสัดส่วนปริมาณของ Si ที่แท้จริงในชิ้นงานจะส่งผลต่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมต่อไป

จากผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม พบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมในอัตราส่วนผสมที่มากขึ้นจะมีสมบัติทางกลดีขึ้น มีความสามารถในการรับ

แรงอัดสูงขึ้นและมีค่าความแข็งแรงจุดครากสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 และเมื่อตรวจสอบความแข็งแรงของโพนก็พบว่าโพนมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 เนื่องจากโพนอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมมีส่วนผสมของ Si ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อพื้นโลหะ ดังนั้น ที่อัตราส่วนผสมเศษอะลูมิเนียมที่สูงขึ้น โพนอะลูมิเนียมก็จะมีปริมาณ Si มากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของโพนดีขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณอนุภาคออกไซด์ที่สูงขึ้นในโพนอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมก็อาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงและความแข็งแรงของโพนอะลูมิเนียม อนุภาคออกไซด์ที่ปรากฏอยู่ในเนื้อพื้นเมตริกซ์จะเปรียบเสมือนอนุภาคเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต (Particulate composite material) ที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการเสีรูปของโครงสร้าง ดังนั้นโพนที่มีอนุภาคออกไซด์ผสมอยู่จะมีความต้านทานการเสีรูปของก้านโพรงอากาศในโครงสร้างโพนเพิ่มขึ้น

สำหรับโพนอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมที่มีขนาดโพรงอากาศแตกต่างกัน สำหรับที่อัตราส่วนผสมเดียวกันของเศษอะลูมิเนียม โพนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่า (12 ppi) จะมีความแข็งแรงสูงกว่าในแต่ละอัตราส่วนผสม ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนี้อาจมีสาเหตุมาจากความหนาแน่นของโพรงอากาศขนาดเล็กที่มีค่าสูงกว่า เพราะโครงสร้างโพนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กจะมีปริมาณก้านโพรงอากาศและมีการเชื่อมต่อกันของเนื้อโลหะมากกว่าโพนที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นผลให้โพนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่ามีปริมาณโพรงอากาศมากกว่าโพนที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่มีปริมาตรเท่ากัน การเชื่อมต่อกันของเนื้อโลหะที่มากกว่าจะช่วยให้โพนสามารถกระจายแรงอัดที่เกิดกับโครงสร้างโพนได้ดีกว่า นอกจากนี้ อนุภาคออกไซด์ที่อยู่ในเนื้อพื้นโลหะก็อาจมีบทบาทให้การเพิ่มความแข็งแรงให้กับโพนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่าได้มากกว่าโพนที่มีขนาดโพรงอากาศขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากโพนที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กจะมีพื้นที่หน้าตัดของก้านโพรงอากาศเล็กกว่า ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคออกไซด์ในเนื้อโลหะของโพนเป็นไปได้อย่างครอบคลุมมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของก้านโพรงอากาศที่ใหญ่กว่า จึงทำให้การเสริมแรงจากอนุภาคออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงกว่า ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของโพนอะลูมิเนียมที่ผสมกับเศษอะลูมิเนียมที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่า

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

- การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบแทรกซึมด้วยความดัน สามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 8 และ 12 ppi ที่มีโครงสร้างโฟมสมบูรณ์ได้ที่อุณหภูมิการหล่อ 1200°C โดยสามารถใช้ปริมาณเศษอะลูมิเนียมได้มากถึง 50 wt. %
- โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมมีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของโฟมโพลียูรีเทนที่ใช้เป็นต้นแบบ ไม่มีตำหนิขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อโครงสร้าง มีเพียงตำหนิขนาดเล็ก เช่น มีผิวหยาบ และมีเศษปูนขนาดเล็กเกาะติดอยู่ที่ผิว
- โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเกรด ADC12 สำหรับทุกส่วนผสม มีโครงสร้างแบบ Dendrite และมีเฟส Eutectic Si ชนิดเข็ม (Acicular) ในเนื้อพื้นโลหะ
- โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมที่มีขนาดโพรงอากาศแตกต่างกันทั้งสองขนาด มีความเค้นอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น แต่โฟมที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่ามีขนาดการเพิ่มขึ้นของความเค้นอัดสูงกว่า
- โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมที่มีขนาดโพรงอากาศแตกต่างกันทั้งสองขนาด มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของโฟมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันสำหรับที่ปริมาณเศษอะลูมิเนียมเท่ากัน
- การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมเศษอะลูมิเนียมเป็นผลมาจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ Si ในเนื้อพื้นโลหะ และอาจเกิดจากอนุภาคออกไซด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในชิ้นงานโฟม

6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

- ในการทำวิจัยนี้พบว่าการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม สามารถกำหนดปัจจัยต่างๆ ในการผลิตเพิ่มขึ้นเพื่อทำการทดลอง โดยใช้ข้อมูลที่มาขึ้นและครอบคลุมยิ่งขึ้น ซึ่งมีปัจจัยในการผลิตหลายอย่างที่ไม่ได้นำมาพิจารณาในการทำวิจัยนี้ เช่น ความหยาบของผิว ความดันในการผลิต หรือลักษณะรูปร่างของเศษอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน เป็นต้น นอกจากนี้ ในส่วนที่ทำการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการแทรกซึมโดยใช้แรงดันนั้น

สามารถที่จะทำการเพิ่มการทดลองโดยทำการผลิตโพลีเมอร์ที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะ
ทำการศึกษาว่าที่อุณหภูมิใดนั้นดีที่สุดในการหลอม เพื่อให้ไนล่อนสามารถไหลได้เต็ม
แบบ การวิจัยนี้จึงเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งก็พอเพียงสำหรับการให้ความรู้
พื้นฐานแก่ผู้ที่สนใจ

เอกสารอ้างอิง

1. Ashby, M.F., et al., Metal foams: a design guide; Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2000.
2. Banhart, J., Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 2001. 46(6): p. 559-U3.
3. Conde, Y., et al., Replication processing of highly porous materials. Advanced Engineering Materials, 2006. 8(9): p. 795-803.
4. Song, X., et al., Temperature-dependent viscosities of eutectic Al–Si alloys modified with Sr and P. Journal of Alloys and Compounds, 2009. 479(1-2): p. 670-673.
5. <http://www.al-mg.com/en/Al-50Si.html>.
6. Van Horn, K.R., Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams Aluminium. Vol. 1. 1967: American Society for Metals.
7. Soboyejo, W.O. and T.S. Srivatsan, Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization and Applications. 2006: CRC Press.
8. Ashby, M.F., et al., Metal foams: a design guide; Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2000.
9. Simone, A.E. and L.J. Gibson, Aluminum foams produced by liquid-state processes. Acta Materialia, 1998. 46(9): p. 3109-3123.
10. San Marchi, C., J.F. Despois, and A. Mortensen, Uniaxial deformation of open-cell aluminum foam: the role of internal damage. Acta Materialia, 2004. 52(10): p. 2895-2902.
11. Andrews, E., W. Sanders, and L.J. Gibson, Compressive and tensile behaviour of aluminum foams. Materials Science and Engineering: A, 1999. 270(2): p. 113-124.
12. San Marchi, C. and A. Mortensen, Deformation of open-cell aluminum foam. Acta Materialia, 2001. 49(19): p. 3959-3969.
13. Andrews, E.W., et al., Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results. International Journal of Mechanical Sciences, 2001. 43(3): p. 701-713.
14. Despois, J.F., et al., Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams. Materials Science and Engineering a-

Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2007. 462(1-2): p. 68-75.

1. Ashby, M.F., et al., *Metal foams: a design guide*; Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, ISBN 0-7506-7219-6, Published 2000, Hardback, 251 pp., \$75.00. *Materials & Design*. Vol. 23. 2002. 119.
2. Banhart, J., *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. *Progress in Materials Science*, 2001. 46(6): p. 559-U3.
3. Conde, Y., et al., *Replication processing of highly porous materials*. *Advanced Engineering Materials*, 2006. 8(9): p. 795-803.
4. Song, X., et al., *Temperature-dependent viscosities of eutectic Al–Si alloys modified with Sr and P*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009. 479(1-2): p. 670-673.
5. ; Available from: <http://www.al-mg.com/en/Al-50Si.html>.
6. Van Horn, K.R., *Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams Aluminium*. Vol. 1. 1967: American Society for Metals.
7. Soboyejo, W.O. and T.S. Srivatsan, *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization and Applications*. 2006: CRC Press.
8. Ashby, M.F., et al., *Metal foams: a design guide*; Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, ISBN 0-7506-7219-6, Published 2000, Hardback, 251 pp., \$75.00. *Materials & Design*, 2002. 23(1): p. 119.
9. Simone, A.E. and L.J. Gibson, *Aluminum foams produced by liquid-state processes*. *Acta Materialia*, 1998. 46(9): p. 3109-3123.
10. San Marchi, C., J.F. Despois, and A. Mortensen, *Uniaxial deformation of open-cell aluminum foam: the role of internal damage*. *Acta Materialia*, 2004. 52(10): p. 2895-2902.
11. Andrews, E., W. Sanders, and L.J. Gibson, *Compressive and tensile behaviour of aluminum foams*. *Materials Science and Engineering: A*, 1999. 270(2): p. 113-124.
12. San Marchi, C. and A. Mortensen, *Deformation of open-cell aluminum foam*. *Acta Materialia*, 2001. 49(19): p. 3959-3969.
13. Andrews, E.W., et al., *Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001. 43(3): p. 701-713.
14. Despois, J.F., et al., *Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams*. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2007. 462(1-2): p. 68-75.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ

Asavavisithchai S., Jareankieathbovorn N. and Srichaiyaperk A. Recycling of aluminium alloy scraps by pressure-assisted investment casting for aluminium foam manufacture. *Materials Testing* 2012; 06: 390-394.