



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาผลของการใช้ชี้เท้าแก่ลดต่อการขยายตัว โครงสร้าง
และความแข็งแรงการอัดของโฟมอะลูมิเนียม

โดย

ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

มิถุนายน 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาผลของการใช้ชี้เข้าเกลบต่อการขยายตัว โครงสร้าง และความ
แข็งแรงการอัดของโฟมอะลูมิเนียม

โดย

ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุน
สนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG4980070
ชื่อโครงการ: การศึกษาผลของการใช้ซีเถ้าแอลบต่อการขยายตัว โครงสร้าง และความ
แข็งแรงการอัดของโฟมอะลูมิเนียม
ชื่อนักวิจัย: ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
E-mail: fmtsas@eng.chula.ac.th
ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

ชิ้นงานอัดขึ้นรูปของ $Al-TiH_2$ ที่ผสมซีเถ้าแอลบที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีได้
ถูกนำไปผลิตเป็นโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์
การวิจัยนี้พบว่าซีเถ้าแอลบมีบทบาทอย่างมากต่อลักษณะโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียม เช่นเดียวกับ
ที่อนุภาคเซรามิกมีผลต่อโฟม ซึ่งส่งผลให้เกิดการปรับปรุงในโครงสร้างโพรงอากาศ เพิ่มความแข็งแรง
อัด และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานของโฟม การวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้
ซีเถ้าแอลบเหมือนเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

คำหลัก: โฟมโลหะ, อะลูมิเนียม, ซีเถ้าแอลบ, กรรมวิธีโลหะผง, สมบัติทางกล

Abstract

Project Code: MRG4980070
Project Title: Effects of rice husk ash on the expansion, structure and compressive strength of Al foams
Investigator: Dr. Seksak Asavavisithchai
Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
E-mail address: fmtsas@eng.chula.ac.th
Project period: 2 years

Rice husk ash (RHA), produced through chemical treatment process, have been incorporated into Al-TiH₂ precursors which were successfully foamed with more uniform structure than pure Al foams. It is found that RHA significantly influences the foam structure in the same way as typical ceramic particles, which results in an improvement in the pore structure and an increase in the compressive strength and energy absorption efficiency. The study demonstrates that RHA can be used as structural stabiliser for Al foam production.

Keywords: Metallic foam, Aluminium, Rice husk ash, Powder metallurgy, Mechanical properties

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเอาซีเถ้าเคลือบซึ่งเป็นของเหลือจากการเผาเคลือบข้าวมาเป็นวัสดุที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้แก่โครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียม และเพื่อศึกษาถึงปริมาณของซีเถ้าเคลือบที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อการขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียม โดยจะทำการศึกษาในโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีซีเถ้าเคลือบที่มีขนาดต่างๆ และจะศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณของซีเถ้าเคลือบต่อความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

ในการทำวิจัยนี้ ได้มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยเริ่มต้นจากการศึกษา รวบรวมข้อมูล และจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจะทำการผลิตซีเถ้าเคลือบซึ่งได้จากการเผาเคลือบข้าว โดยนำเคลือบข้าวไปต้มด้วยกรด HCl แล้วนำไปเผาด้วยอัตราความร้อน $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึง $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ และคัดแยกขนาดซีเถ้าเคลือบให้มีขนาดต่างๆ กัน ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของซีเถ้าเคลือบที่ได้ด้วยเครื่อง SEM และหาสารประกอบทางเคมีของซีเถ้าเคลือบ ทำการอัดขึ้นรูป Precursor จากผงอะลูมิเนียมผสมกับซีเถ้าเคลือบในปริมาณต่างๆ กันที่ 1, 2 และ 3 wt.% และผสมกับสารปล่อยแก๊ส TiH_2 ในปริมาณ 0.6 wt.% และวัดความหนาแน่นของ Precursor ที่ได้ จากนั้นทำการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจาก Precursor ที่มีซีเถ้าเคลือบผสมในปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยจะทำการวัดการขยายตัวสูงสุดและความหนาแน่นของชิ้นงาน วิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นในเชิงโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมด้วยซีเถ้าเคลือบในปริมาณต่างๆ และผลิตชิ้นงานโฟมสำหรับการทดสอบการอัด และวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงอัดในรูปกราฟแสดงค่าความเค้นและความเครียด โดยใช้ความเร็วในการอัดที่ $0.5\text{ mm}/\text{min}$ จนถึงค่าความเครียดที่ 70%

จากผลการวิจัยทำให้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การผสมซีเถ้าเคลือบทั้งแบบบับดด้วยกรด HCl และที่ได้รับจากโรงไฟฟ้ากับผงอะลูมิเนียมจะทำให้ความหนาแน่นของ Precursor ลดลง โดยความหนาแน่นจะลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณซีเถ้าเคลือบที่ผสมเพิ่มขึ้น
2. การผสมซีเถ้าเคลือบในโฟมอะลูมิเนียมทั้งแบบบับดด้วยกรด HCl และที่ได้รับจากโรงไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะทำให้การขยายตัวสูงสุดลดลง โดยการขยายตัวจะลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของซีเถ้าเคลือบที่ผสมมีมากขึ้น
3. การผสมซีเถ้าเคลือบทั้งแบบบับดด้วยกรด HCl และที่ได้รับจากโรงไฟฟ้าในโฟมอะลูมิเนียมจะทำให้โครงสร้างโดยรวมของโฟมดีขึ้น มีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพมากขึ้น ลดการเกิดชั้นหนาของเนื้ออะลูมิเนียมที่ฐานของโฟม และโครงสร้างที่ดีขึ้นนี้ยังพบเมื่อปริมาณซีเถ้าเคลือบที่ผสมเพิ่มขึ้น
4. ซีเถ้าเคลือบที่มีขนาดใหญ่ $364\text{ }\mu\text{m}$ เมื่อผสมในโฟมอะลูมิเนียมจะทำให้ความหนาของผนังโครงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาของผนังโครงอากาศจะมีขนาดเล็กลงเมื่อซีเถ้าเคลือบที่

ผสมมีขนาดเล็กกลง และมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของผนังโพรงอากาศของโพลีเอเธนีนีเยมบริสุทธิ์

5. ปริมาณซีอีเอ็มที่ผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงการขยายตัวและโครงสร้างของโพลีเอเธนีนีเยมในการทดลองนี้ คือที่ 1 wt.% ที่ขนาด 364 μm เนื่องจากโพลีเอเธนีนีเยมที่ได้จะมีการขยายตัวสูงสุดที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าโพลีเอเธนีนีเยมบริสุทธิ์เล็กน้อย และได้โครงสร้างโพลีเอเธนีนีเยมที่สม่ำเสมอด้วย

6. การผสมซีอีเอ็มที่ผสมทั้งแบบบับเบิลด้วยกรด HCl และที่ได้รับจากโรงไฟฟ้าทำให้โพลีเอเธนีนีเยมมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น มีความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น เมื่อซีอีเอ็มที่ผสมในโพลีเอเธนีนีเยมมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้โพลีเอเธนีนีเยมมีความแข็งแรงและการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นอีก เนื่องมาจากการที่ซีอีเอ็มช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผนังโพรงอากาศ ทำให้โพรงอากาศสามารถรับแรงกระทำต่อพื้นที่ได้สูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ความแข็งแรงโดยรวมของโพลีเอเธนีนีเยมเพิ่มขึ้นไปด้วย

7. การใช้ซีอีเอ็มที่ได้รับจากโรงไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพของโพลีเอเธนีนีเยมไม่ได้ให้ผลที่แตกต่างมากนักจากการใช้ซีอีเอ็มที่บับเบิลด้วยสารเคมี ดังนั้นในการใช้งานจริง จึงอาจใช้ซีอีเอ็มที่ได้รับจากโรงไฟฟ้าโดยตรงก็ได้

คำนำ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนในรูปของทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2549 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากาผลของการผสมซี้เ้าแกลบลงไปใโม่อะลูมิเนียมเพื่อช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพและสมบัติทางกลของโม่ การทำวิจัยนี้ได้ทำการผลิตโม่อะลูมิเนียมที่ผสมซี้เ้าแกลบที่บ่าบดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีขนาดที่แตกต่างกัน ในสัดส่วนปริมาณที่แตกต่างกันด้วย การผลิตโม่อะลูมิเนียมนี้สามารถทำได้จากการผสมผงอะลูมิเนียมกับซี้เ้าแกลบ แล้วนำไปอัดขึ้นรูป จากนั้นจึงนำไปเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัวเป็นโม่อะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบปิด

โม่อะลูมิเนียมจัดอยู่ในประเภทโม่โลหะซึ่งเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดใหม่ทีเ้าได้รับการพัฒนาในระยะเวลาไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา จุดเด่นของโม่อะลูมิเนียมคือการมีสมบัติทางกลทีดีในขณะทีมีน้ำหนักทีเบามาก จึงเหมาะกับการใช้งานในทางโครงสร้างทีต้องการน้ำหนักเบา เช่น รถยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศ เป็นต้น ผู้วิจัยหวังว่าผลจากการวิจัยนี้จะช่วยทำให้นักวิจัย หน่วยงาน และภาคอุตสาหกรรมทีเกี่ยวข้องได้มีความสนใจ และทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในเรื่องของโม่อะลูมิเนียมสำหรับประเทศไทยให้มีความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร ทีช่วยกรุณาแนะนำ และให้แนวทางในการทำวิจัยแก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณ คุณรัฐ ดันติศิริไพบุลย์ ในการช่วยเตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ และช่วยทำการทดลองบางส่วนในโครงการวิจัยนี้

ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	li
บทสรุปผู้บริหาร.....	lii
คำนำ.....	v
สารบัญ.....	vi
สารบัญรูปภาพ.....	ix
สารบัญตาราง.....	xii
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
2.1.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ.....	3
2.1.3 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ.....	4
2.1.4 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ.....	4
2.1.5 การนำไปใช้งานสำหรับโฟมโลหะ.....	4
2.2 โฟมอะลูมิเนียม.....	5
2.2.1 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	6
2.2.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง.....	6
2.2.3 กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง.....	7
2.3 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง.....	9
2.3.1 ความหนาแน่นของ Precursor.....	9
2.3.2 ลักษณะและปริมาณของสารปล่อยแก๊ส.....	10
2.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม.....	10
2.3.4 อัตราการให้ความร้อน.....	10
2.3.5 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	11
2.3.6 วัสดุผสม.....	12
2.4 การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม.....	14

2.5 สมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียม.....	16
2.5.1 ความสามารถในการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียม.....	16
2.5.2 การดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียม.....	19
2.6 แกลบข้าว.....	21
2.6.1 ส่วนประกอบของแกลบข้าว.....	21
2.6.2 ซิลิกาในแกลบข้าว.....	22
2.6.3 การเตรียมซิลิกาจากแกลบ.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	24
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	24
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	25
3.3.1 การเตรียมและการตรวจสอบคุณลักษณะของซีเมนต์แกลบจากแกลบข้าว....	25
3.3.2 การผลิต Precursor และโพลีอะลูมิเนียม.....	26
3.3.3 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และโพลีอะลูมิเนียม.....	27
3.3.4 การทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียม.....	27
3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Precursor และโพลีอะลูมิเนียม.....	27
3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียม.....	28
3.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	28
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย.....	29
4.1 คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุ.....	29
4.2 โครงสร้างผลึกของซีเมนต์แกลบ.....	31
4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์แกลบ.....	32
4.4 ความหนาแน่นของ Precursor.....	33
4.5 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....	34
4.6 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์แกลบ.....	36
4.7 โครงสร้างมหภาคของโพลี.....	40
4.8 โครงสร้างจุลภาคที่ผนังโพรงอากาศของโพลี.....	42
4.9 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวของโพรงอากาศของโพลี.....	44
4.10 สมบัติทางกล.....	45
บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	51
5.1 ผลของซีเมนต์แกลบต่อการขยายตัวของโพลี.....	51
5.2 ผลของซีเมนต์แกลบต่อโครงสร้างของโพลี.....	52
5.3 ผลของซีเมนต์แกลบต่อความสามารถในการรับแรงอัดของโพลี.....	54
5.3.1 ความแข็งแรงอัด.....	54

5.3.2 การดูดซับพลังงาน.....	55
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	57
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	57
6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก ก.....	62

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบ (a) ปิด และ (b) เปิด.....	3
รูปที่ 2.2 กรรมวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	6
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง.....	7
รูปที่ 2.4 การขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	8
รูปที่ 2.5 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ที่ความหนาแน่นต่างๆ ของ Precursor.....	9
รูปที่ 2.6 การขยายตัวของอะลูมิเนียม 6061 ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆกันที่อุณหภูมิเตา 800°C.....	11
รูปที่ 2.7 ผลของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีต่อการขยายตัวของโฟม อะลูมิเนียมภายใต้ภาวะการให้ความร้อนเดียวกัน.....	12
รูปที่ 2.8 ผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	12
รูปที่ 2.9 ผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงดึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม.....	13
รูปที่ 2.10 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม.....	13
รูปที่ 2.11 บริเวณ Plateau border.....	14
รูปที่ 2.12 แสดงผลของอนุภาคของแข็งต่อการลดลงของ Capillary pressure ระหว่างบริเวณ Plateau border และ Film.....	15
รูปที่ 2.13 ผลของขนาดและปริมาณของซิลิกา (SiO ₂) ที่เติมเข้าไปต่อความเสถียร ของน้ำ.....	16
รูปที่ 2.14 (a) Stress-Strain curve ของโฟมโลหะในอุดมคติ (b) Stress-Strain curve ของ โฟมโลหะที่ได้จากการทดสอบจริง.....	17
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และ โลหะ ผสม AlSi7Mg0.45 (a) Young's modulus (b) ความเค้นแรงอัด.....	17
รูปที่ 2.16 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณรูพรุน ของโฟม และ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับความเครียด ของ โลหะผสม AlSi7Mg0.45.....	19
รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟม ต่างชนิดกัน.....	20
รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับความสามารถในการดูดซับ พลังงานของโฟมอะลูมิเนียม.....	20
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	26
รูปที่ 3.2 ทิศทางในการตัดโฟมอะลูมิเนียม.....	27
รูปที่ 3.3 ทิศทางที่ใช้ในการตัด Precursor.....	28

รูปที่ 3.4 ทิศทางในการตัดโฟมอะลูมิเนียมสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	28
รูปที่ 4.1 ภาพ SEM แสดงลักษณะรูปร่างของผงต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย.....	30
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์.....	32
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของผง SiO_2	32
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความหนาแน่นของ Precursor เมื่อผสมซีเมนต์ขนาดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ.....	34
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่เผาที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ...	35
รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เผาที่ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	36
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $364\ \mu\text{m}$ และเผาที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $200\ \mu\text{m}$ และเผาที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $81\ \mu\text{m}$ และเผาที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	38
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $18\ \mu\text{m}$ และเผาที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	38
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์จากโรงไฟฟ้าและเผาที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	39
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมผง SiO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ.....	39
รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และที่ผสมผงซีเมนต์ทั้งแบบบดและที่ได้จากโรงไฟฟ้า และที่ผสม SiO_2 ในปริมาณต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม (a) Pure Al (b) RHA No. 1 (c) RHA No. 4 (d) RHA (Power plant) และ (e) SiO_2	43
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวของผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม (a) Pure Al (b) RHA No. 1 (c) RHA No. 4 (d) RHA (Power plant) และ (e) SiO_2	45
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความดัน-ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $364\ \mu\text{m}$	46
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความดัน-ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $200\ \mu\text{m}$	47
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความดัน-ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $80\ \mu\text{m}$	47
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความดัน-ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย $18\ \mu\text{m}$	48

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าเกลบจาก โรงไฟฟ้า.....	49
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาค SiO_2	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ การนำไปใช้งาน และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ของโฟมโลหะ.....	5
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของแกลบ.....	21
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ และเถ้าแกลบที่ได้จากแกลบที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	22
ตารางที่ 4.1 สรุปผลการวิเคราะห์วัสดุผงต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย.....	31
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเถ้าแกลบที่บำบัดด้วย HCl และซีเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า.....	33
ตารางที่ 4.3 ปริมาณ ขนาด และสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศที่วัดจากชั้นงานโฟมในรูปแบบที่ 4.12.....	42
ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม.....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

โฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดใหม่ที่มีศักยภาพสูงที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการยานยนต์ เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการดูดซับพลังงานจากการอัดกระแทกของโฟม โดยที่โฟมนั้นมีน้ำหนักที่เบากว่าอะลูมิเนียมทั่วไปมาก นอกจากนี้ยังช่วยในการประหยัดพลังงานและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผงนั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากกว่ากรรมวิธีโลหะเหลว เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมให้มีรูปร่างใกล้เคียงกับแบบที่ต้องการได้ ปฏิบัติการเกิดโฟมในกรรมวิธีโลหะผงนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาเพียงไม่กี่นาทีและยากต่อการควบคุม ในขณะที่โฟมเกิดการขยายตัวนั้นจะเกิดการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานของโฟม เนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงของโลกและการรวมตัวกันของโพรงอากาศในโฟม ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้โฟมที่ได้มีเสถียรภาพต่ำและโครงสร้างโฟมโดยรวมไม่มีความสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลและการดูดซับพลังงานจากการอัดกระแทกของโฟมอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไปด้วย และนี่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความสามารถในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมไม่ดี อย่างไรก็ตามการเพิ่มเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการผสมอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก เช่น อนุภาคเซรามิกอย่าง Al_2O_3 , SiC และ TiB_2 ลงไปในปริมาณเล็กน้อยเพียง 5-15 wt.% เพื่อเพิ่มความหนืดให้กับโฟม และดังนั้นช่วยลดการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานของโฟม ผลที่ได้คือโฟมอะลูมิเนียมจะมีเสถียรภาพที่สูงขึ้น มีโครงสร้างโดยรวมและสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และง่ายต่อการควบคุมคุณภาพของโฟม อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเติมอนุภาคเซรามิกจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับโฟม แต่ราคาของอนุภาคเซรามิกนั้นค่อนข้างสูงและจะทำให้ราคาโดยรวมของการผลิตโฟมอะลูมิเนียมสูงขึ้นด้วย

เนื่องจากประเทศไทยส่งออกข้าวเป็นรายใหญ่ของโลก และมีผลผลิตที่เหลือจากการสีข้าวซึ่งก็คือแกลบข้าวที่ได้จากโรงสีข้าว โดยในแต่ละปีจะมีแกลบข้าวเหลือใช้ในปริมาณมากและมีการนำแกลบข้าวบางส่วนไปใช้ประโยชน์ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ใช้ทำวัสดุก่อสร้าง และอื่นๆ และบางส่วนถูกนำไปเผาเป็นขี้เถ้าแกลบคุณภาพต่ำส่งออกไปต่างประเทศในราคาที่ถูกในปริมาณมาก ในการนำเสนอการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้ทำวิจัยมีความคิดที่จะนำขี้เถ้าแกลบมาใช้เป็นวัสดุที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียม เนื่องจากในขี้เถ้าแกลบมีปริมาณอนุภาคของแข็งอย่างซิลิกา (SiO_2) ประกอบอยู่ด้วยอัตราส่วนที่สูงถึง 87-97 wt.% ดังนั้นการผสมขี้เถ้าแกลบลงไปในโฟมอะลูมิเนียมอาจนำไปสู่การปรับปรุงทางโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟม ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มเสถียรภาพโดยรวมของโฟม ทำให้โฟมที่ได้มีโครงสร้างรูพรุนที่สม่ำเสมอและมีสมบัติทางกลที่ดีและแน่นอน การใช้ขี้เถ้าแกลบในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียมแทนที่จะใช้อนุภาคเซรามิก ยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตโฟมและช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับแกลบข้าวอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเอาซีเถ้าแอลบที่ได้จากการเผาแอลบข้าวมาเป็นวัสดุที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (เพิ่มความสามารถในการขยายตัวและปรับปรุงโครงสร้างรูพรุน) ให้กับโฟมอะลูมิเนียม
- เพื่อศึกษาถึงปริมาณของซีเถ้าแอลบที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อการขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียม
- เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีซีเถ้าแอลบผสมอยู่
- เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณของซีเถ้าแอลบที่มีต่อความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- เตรียมและศึกษาลักษณะของซีเถ้าแอลบก่อนผสมกับผงอะลูมิเนียมในปริมาณ 1, 2, 3 wt. %
- วัดการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับซีเถ้าแอลบในปริมาณต่างๆ ที่ 800°C
- ตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้
- ตรวจสอบวิเคราะห์ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมกับซีเถ้าแอลบในปริมาณต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- สามารถนำซีเถ้าแอลบมาใช้ในการเพิ่มความเสถียรภาพให้กับโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมซึ่งจะช่วยส่งผลให้มีการปรับปรุงการขยายตัวของโฟม
- มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับบทบาทของซีเถ้าแอลบต่อการเพิ่มความเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียม
- มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของซีเถ้าแอลบต่อการขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียม
- มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของการใช้ซีเถ้าแอลบในปริมาณต่างๆ ที่มีต่อความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม
- คาดว่าจะสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารงานวิจัยของต่างประเทศได้ 1-2 บทความ

บทที่ 2

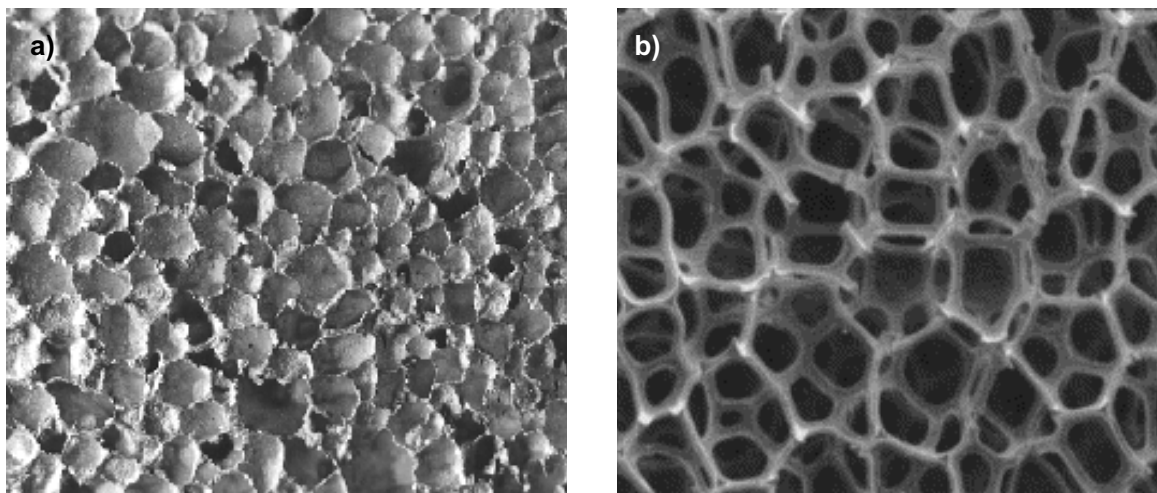
การทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาในอดีต

2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันในปริมาตรเท่ากัน มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงและมีสมบัติเด่นอีกหลายประการ [1] โฟมโลหะยังมีลักษณะเด่นซึ่งสามารถจำแนกได้ในเทอมของรูปร่างของโพรงอากาศ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ปริมาณของโพรงอากาศ และขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ

2.1.1 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]

2.1.2 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

2.1.3 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ

ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ (P) ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตรของโลหะชนิดนั้นๆ โดยปริมาณของโพรงอากาศสามารถแสดงได้ในสมการ (2.2)

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

2.1.4 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ

สมบัติทางกลของโฟมโลหะนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ ความแตกต่างของวิธีการผลิตนั้นส่งผลให้เกิดชนิดของโครงสร้างโพรงอากาศที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ ขนาดของโพรงอากาศที่มีความแตกต่างกัน จะมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงานทดสอบ (Size effect) ซึ่งจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการออกแบบและทดสอบวัสดุ

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

2.1.5 การนำไปใช้งานสำหรับโฟมโลหะ

การนำไปใช้งานของโฟมโลหะนั้น จะนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากโฟมโลหะมีความหนาแน่นต่ำและความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จึงถูกนำไปใช้ในงานทางด้านโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา 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	- ใส่แบบหล่อทราย - 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

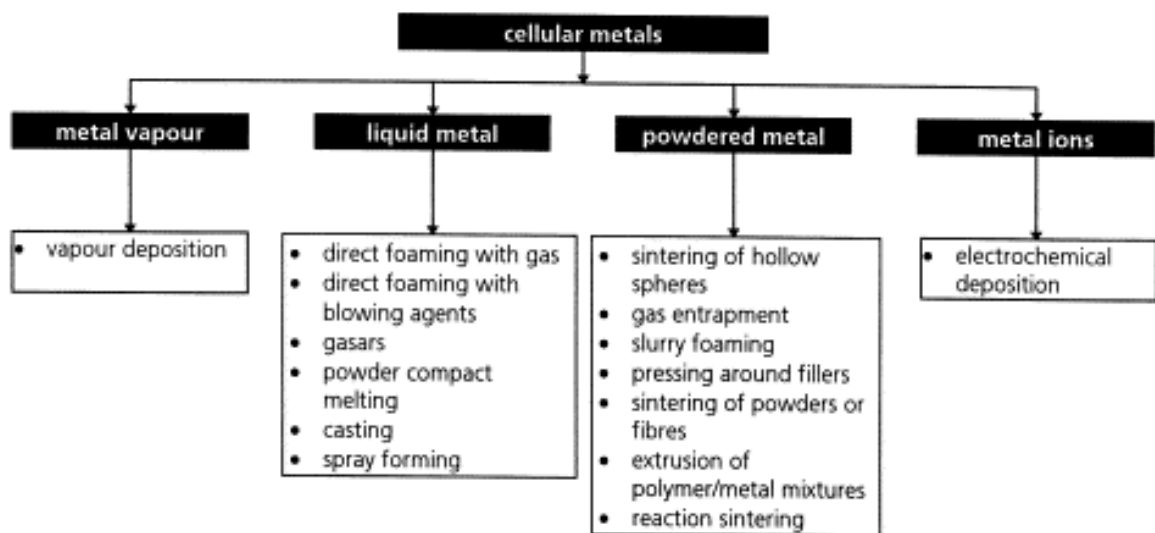
2.2 โฟมอะลูมิเนียม

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

โพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้สมบัติทางกลตามที่ต้องการ การใช้งานหลักๆของโฟมอะลูมิเนียม คือ ใช้เป็นอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกในรถยนต์ ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ และใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียงบนถนน

2.2.1 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

วิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถจำแนกได้ตามสถานะของอะลูมิเนียมในกระบวนการผลิต คือ 1) การผลิตโฟมจากอะลูมิเนียมหลอมเหลว 2) การผลิตโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง 3) การผลิตโดยใช้กรรมวิธีแก๊สของสารประกอบโลหะ (Gaseous metallic compounds) และ 4) การผลิตโดยใช้สารละลายไอออน (Metal-ion solution) แต่วิธีที่นิยมในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีเพียง 2 วิธีแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถควบคุมการผลิตได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก และมีต้นทุนต่อการผลิตที่ต่ำกว่าอีก 2 วิธี

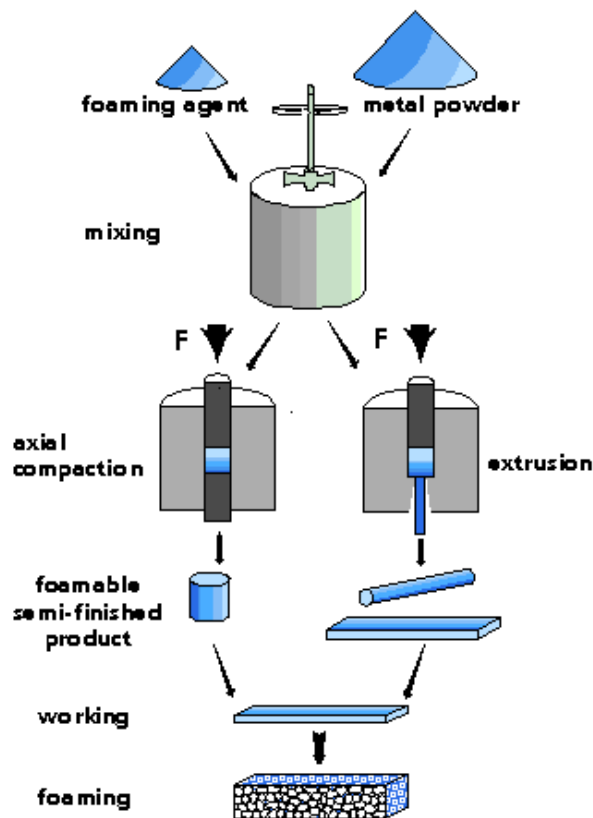


รูปที่ 2.2 กรรมวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม [2]

2.2.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง

กระบวนการผลิตเริ่มจากการผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับสารปล่อยแก๊ส (Foaming agent) เพื่อทำให้เกิดโพรงอากาศขึ้นในโฟม โดยทั่วไปจะนิยมใช้สารปล่อยแก๊สเป็นไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) ซึ่งใช้ในปริมาณระหว่าง 0.6-1.0 wt.% ก็เพียงพอต่อการสร้างโพรงอากาศภายในโฟม [3] ผงที่ผ่านการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างดีแล้วจะถูกนำไปอัดขึ้นรูป ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วจะเรียกว่า “Foamable precursor” หรืออาจเรียกสั้นๆ ว่า “Precursor” การอัดขึ้นรูปนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบเย็นและแบบร้อน การอัดขึ้นรูปที่ใช้ความร้อนนั้นมีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากกว่า เนื่องจากจะได้

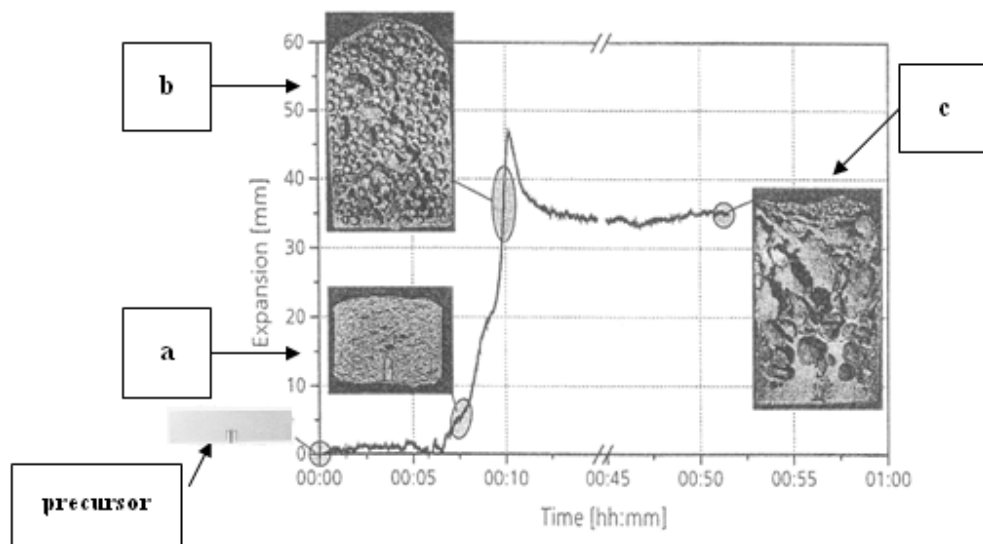
ความหนาแน่นของ Precursor ที่สูงใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) ของโลหะ แต่สำหรับผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์การอัดขึ้นรูปแบบเย็นก็สามารถที่จะผลิต Precursor ที่มีความหนาแน่นสูงได้ จากนั้นนำ Precursor ไปใส่ในแม่พิมพ์และนำไปเข้าเตาอบ เมื่อให้ความร้อนแก่ Precursor จนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม TiH_2 ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ $400-450^\circ\text{C}$ จะปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซึ่งจะสร้างโพรงอากาศใน Precursor ที่กำลังหลอมเหลวทำให้เกิดการขยายตัวขึ้น และจะได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูพรุนแบบปิด การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง มีขั้นตอนเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง [2]

2.2.3 กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง

ระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผงดำเนินไปนั้น Precursor จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาหนึ่ง ซึ่งกลไกเหล่านี้จะส่งผลต่อรูปร่างของ Precursor เมื่อขยายตัวเป็นโฟมอะลูมิเนียม ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงการขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.4 การขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ [4]

กลไก a - เริ่มเกิดโพรงอากาศขึ้นภายใน Precursor ในขั้นตอนนี้จะเริ่มเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากสารปล่อยแก๊สเริ่มเกิดการสลายตัวและให้แก๊สไฮโดรเจนออกมา โพรงอากาศนี้จะมีรูปร่างขึ้นอยู่กับวิธีการในการขึ้นรูป Precursor โดยในขั้นตอนนี้ขนาดของ Precursor จะมีการขยายขึ้นประมาณ 0-30%

กลไก b - การโตขึ้นของโพรงอากาศ ในขั้นตอนนี้จะยังคงเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่ และโพรงอากาศที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนหนึ่งเกิดจากปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของสารปล่อยแก๊สเพิ่มมากขึ้น และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ รูปร่างของโพรงอากาศจะเริ่มเปลี่ยนจากแถบยาวในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัดไปเป็นโพรงอากาศที่มีลักษณะกลม เมื่อเวลาผ่านไป โพรงอากาศที่มีรูปร่างกลมจะขยายตัวขึ้นจนกระทั่งไม่มีพื้นที่เพียงพอที่จะเกิดเป็นโพรงอากาศที่มีรูปร่างกลมได้อีก และจะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ในขั้นตอนนี้ขนาดของ Precursor จะมีการขยายตัวขึ้นประมาณ 50-400%

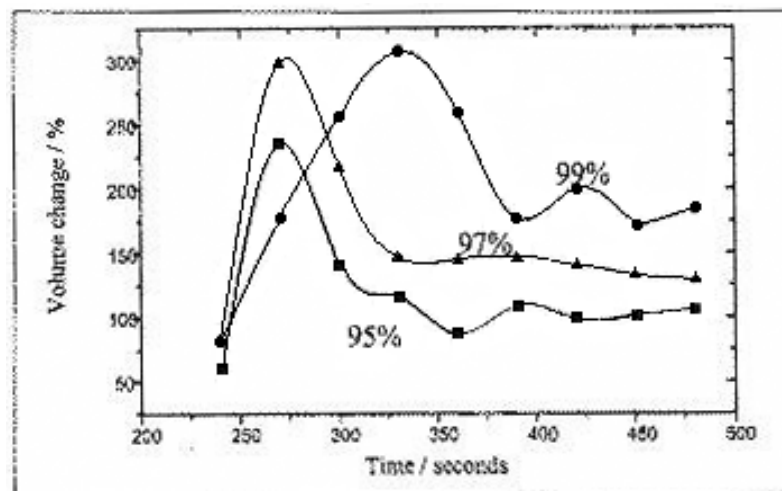
กลไก c - การยุบตัวของโครงสร้างโฟม หลังจากที่เกิดโพรงอากาศขยายตัวมากที่สุดและการสลายตัวของสารปล่อยแก๊สใกล้หยุดลง จะเกิดการยุบตัวของโฟมขึ้นทำให้ได้โฟมที่มีรูปร่างผิดปกติ กลไกหลักในการเกิดการยุบตัวของโฟม คือการไหลของน้ำโลหะไปที่ฐานของโฟม (Drainage) และการรวมตัวของโพรงอากาศ (Cell coalescence) กลไกการไหลของน้ำโลหะไปที่ฐานของโฟมเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงโลก และผลของแรงเนื่องจากแรงตึงผิว (Capillary force) ทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำทำให้บริเวณฐานของโฟมมีลักษณะเป็นชั้นหนาของอะลูมิเนียม การเกิดการรวมตัวของโพรงอากาศเกิดจากการที่โพรงอากาศ 2 โพรง รวมตัวกันเกิดเป็นโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การรวมตัวของโพรงอากาศนี้เป็นผลมาจากการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศ

2.3 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง

ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง มีปัจจัยหลักๆ ที่สำคัญต่อการขยายตัวและโครงสร้างของโฟม ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ความหนาแน่นของ Precursor, ลักษณะและปริมาณของสารปล่อยแก๊ส, อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม, อัตราการให้ความร้อน, บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม และธาตุผสม

2.3.1 ความหนาแน่นของ Precursor

ในการอัดขึ้นรูป Precursor นั้น พบว่าความหนาแน่นของ Precursor จะต้องมีความหนาแน่นทางทฤษฎีไม่ต่ำกว่า 94% จึงจะทำให้เกิดการขยายตัวได้ [5, 6] เนื่องจากที่ความหนาแน่นทางทฤษฎี 94% นั้นเป็นความหนาแน่นที่ช่องว่างในชิ้นงานที่เชื่อมต่อกันเปลี่ยนไปเป็นช่องว่างที่ไม่เชื่อมต่อกัน อย่างไรก็ตามพบว่าเพื่อให้เกิดการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ดีนั้น จำเป็นที่จะต้องอัดขึ้นรูป Precursor ให้มีความหนาแน่นทางทฤษฎีไม่น้อยกว่า 99% ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ที่ความหนาแน่นของต่างๆ ของ Precursor [5]

ถ้าความหนาแน่นของ Precursor ไม่เพียงพอจะทำให้มีรูพรุนเชื่อมต่อกันอยู่ใน Precursor เป็นจำนวนมากส่งผลให้ในระหว่างการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดโฟมนั้น แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดจากการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ สามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโฟม (Foamability) ของ Precursor ลดลง เมื่อเพิ่มแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป Precursor มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของ Precursor สูงขึ้นส่งผลให้การขยายตัวของ Precursor ในขั้นตอนการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูป จะทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างผงโลหะเพิ่มมากขึ้นและเกิดการเชื่อมติดกันแบบเย็นของผงมากขึ้น (Cold welding) ส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจนแพร่ผ่านได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การสูญเสียแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูปยังช่วยเพิ่มความเสถียรของโฟมมากขึ้น อันเป็นผล

มาจากการแตกออกของชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวของผงอะลูมิเนียม ซึ่งฟิล์มออกไซด์ที่แตกออกนั้นจะมี ส่วนช่วยในการป้องกันการยุบตัวของโฟม [7]

2.3.2 ลักษณะและปริมาณของสารปล่อยแก๊ส

เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของผง TiH_2 ที่ยังไม่ผ่านการอัดขึ้นรูปอยู่ที่ประมาณ $380-570^{\circ}C$ [8, 9] Von Zeppelin et al [10] พบว่าการสลายตัวของ TiH_2 นั้นขึ้นอยู่กับบรรยากาศที่ให้ความร้อน ถ้าในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่เพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ TiH_2 เปลี่ยนไป เนื่องจากออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับ TiH_2 เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ขึ้น ซึ่งชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของ TiH_2 เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปก็มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของ TiH_2 ด้วย เนื่องจากหากใช้แรงดันที่สูงเพียงพอที่จะทำให้ TiH_2 ที่มีลักษณะเปราะเกิดการแตกออก จะทำให้เกิดผิวใหม่ที่ไม่มีชั้นฟิล์มออกไซด์ปกคลุมส่งผลให้ความสามารถในการสลายตัวเกิดได้ง่ายขึ้น Yang และ Hur [11] พบว่าปริมาณของ TiH_2 มีผลต่อรูปร่างของโพรงอากาศที่เกิดขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiH_2 จะทำให้ค่าความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ของโพรงที่สามารถวัดได้

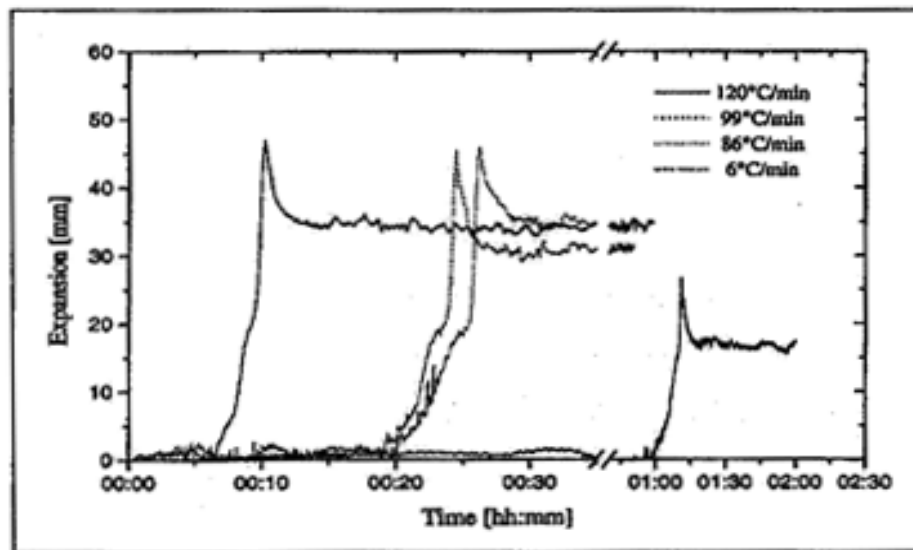
2.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม

จากการศึกษาของ Duarte และ Banhart [4] ถึงผลของอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้ในการผลิตโฟม ที่ทำจาก AISi7 และ อะลูมิเนียมเกรด 6061 โดยมีการใช้อุณหภูมิในช่วง $600-800^{\circ}C$ พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมมีผลต่อกระบวนการผลิตโฟมเป็นอย่างมาก โดยที่ถ้าอุณหภูมิสุดท้ายในการผลิตโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิ Solidus ของโลหะผสมแล้ว การขยายตัวที่เกิดขึ้นจะเป็นเพียงการขยายตัวในสถานะของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอยู่ในช่วงของ Solidus/Liquidus จะสามารถพบการเกิดโฟมได้ และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงมากขึ้นจะทำให้เกิดการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์มากขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น Yang และ Hur [11] พบว่าการขยายตัวของโฟมในขั้นต้นนั้นจะมีลักษณะของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การขยายตัวสูงมากขึ้น และที่อัตราการขยายตัวสูงจะเกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) มากขึ้นและโพรงอากาศจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (Coarsening) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศ

2.3.4 อัตราการให้ความร้อน

จากการศึกษาถึงผลของอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ต่อการผลิตโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมเกรด 6061 ได้ผลเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 2.6 ที่อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น จะเกิดการขยายตัวของ Precursor เร็วกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากเกิดการหลอมเหลวของ Precursor ที่เร็วกว่า และที่อัตราการให้ความร้อนไม่แตกต่างกันมากนักพบว่า อัตราการขยายตัวของ Precursor มีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำกว่ามากพบว่าอัตราการขยายตัว

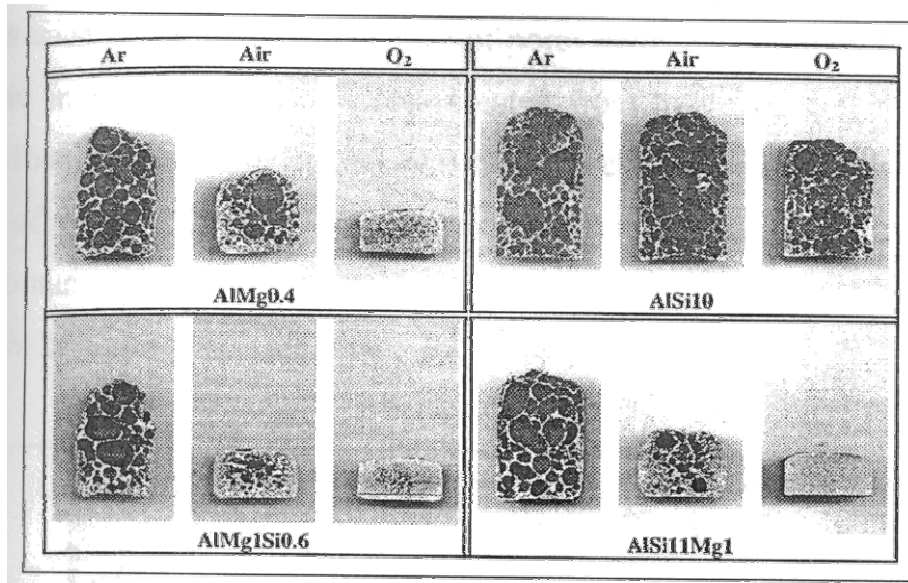
สูงสุดของ Precursor มีค่าต่ำกว่าที่อัตราการให้ความร้อนอื่นๆ ซึ่งเหตุผลที่อาจเป็นไปได้เนื่องมาจาก แก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ได้แพร่ออกไปจาก Precursor ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 500°C เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์อย่างรวดเร็ว และอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ขึ้นที่ผิวและภายในของ Precursor ในบริเวณที่อากาศสามารถผ่านเข้าไปได้ ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีจุดหลอมเหลวสูงมากจึงทำให้อยู่ในสถานะของแข็งตลอดทั้งกระบวนการผลิตโฟมและมีส่วนในการยับยั้งการขยายตัวของ Precursor



รูปที่ 2.6 การขยายตัวของอะลูมิเนียม 6061 ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆกันที่อุณหภูมิเตา 800°C [4]

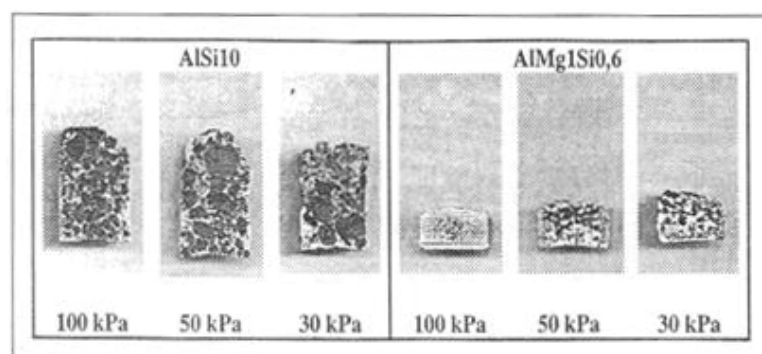
2.3.5 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

เพื่อให้การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเกิดขึ้นมากที่สุด บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม บรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีผลโดยตรงต่อการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมอะลูมิเนียม พบว่าบรรยากาศเฉื่อยจะมีผลทำให้การขยายตัวของโฟมที่ทำจากโลหะผสมที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียม (Mg) เพิ่มขึ้น สำหรับในโลหะผสมที่มีแนวโน้มการเกิดออกซิเดชันต่ำ บรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมจะมีผลต่อการขยายตัวของโฟมเพียงเล็กน้อย ผลของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ภายใต้ภาวะการให้ความร้อนเดียวกัน [12]

ความดันภายนอกที่ให้กับโฟมในขั้นตอนการผลิตมีผลต่อการขยายตัวของโฟม การลดลงของความดันภายนอกส่งผลให้ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าของโฟมที่กำลังขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความสามารถในการขยายตัวของผิวหน้าโฟมมากขึ้น รูปที่ 2.8 แสดงผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟม



รูปที่ 2.8 ผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม [12]

2.3.6 ธาตุผสม

ธาตุผสม (Alloying elements) ที่เติมเข้าไปในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีผลต่อแรงตึงผิวและความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมในขณะทำการผลิตโฟม แรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดลงเมื่อเติมธาตุผสม เช่น Bi, Ca, Li, Mg, Pb, Sb, หรือ Sn ในทางตรงกันข้าม การเติม Ag, Cu,