

ผลของผงอะลูมิเนียมและผงไทเทเนียมไฮไดรด์ ที่ผ่านการอบให้ความร้อน  
ต่อความสามารถในการโฟม โครงสร้าง และคุณสมบัติทางกล ของโฟมอะลูมิเนียม

นายอารีฟิน หมดแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HEAT-TREATED Al AND TiH<sub>2</sub> POWDERS ON FOAMABILITY, STRUCTURE  
AND MECHANICAL PROPERTY OF Al FOAM



Mr. Areefeen Mudkaew

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของผงอะลูมิเนียมและผงไทเทเนียมไฮโดรด์ ที่ผ่านการอบให้  
ความร้อนต่อความสามารถในการโฟม โครงสร้าง และคุณสมบัติ  
ทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

โดย

นายอารีฟิน หมัดแก้ว

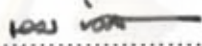
สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

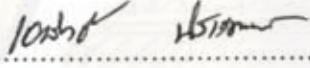
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

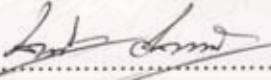
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

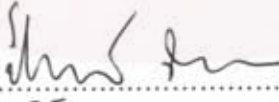
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

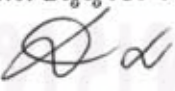
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสาร์ตณพร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ปัญญาวัชร วังยาว)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. สมพงษ์ ศรีมโนเสาวภาคย์)

ศูนย์วิศวกรรมโลหการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อารีฟิน หมัดแก้ว : ผลของผงอะลูมิเนียมและผงไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ต่อความสามารถในการโฟม โครงสร้าง และคุณสมบัติทางกล ของโฟมอะลูมิเนียม (EFFECTS OF HEAT-TREATED Al AND TiH<sub>2</sub> POWDERS ON FOAMABILITY, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTY OF Al FOAM) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 78 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของผงอะลูมิเนียมและผงไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ต่อความสามารถในการโฟม โครงสร้าง และคุณสมบัติทางกล ของโฟมอะลูมิเนียม. การอบให้ความร้อนผง Al เป็นผลให้เกิดออกไซด์มากขึ้น โดยออกไซด์มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ลดพลังงานอิสระหรือแรงดึงผิวอีกทั้งทำให้ผนังโพรงอากาศมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้โฟมมีเสถียรภาพมากขึ้น ในขณะที่ผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อน เป็นผลให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นทำให้ปริมาณแก๊สที่เล็ดลอดออกไปในระหว่างการโฟมลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิในการสลายตัวของผง TiH<sub>2</sub> เข้าใกล้ อุณหภูมิการหลอมเหลวของ Al

การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ผ่านการอบให้ความร้อน และผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อน พบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C มีการขยายตัวสูงสุดของโฟมสูง และมีโครงสร้างโพรงอากาศที่ดีที่สุด ออกไซด์ที่บรรจุในผง Al ที่สูงขึ้นเนื่องจากการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้การขยายตัวสูงสุดของโฟมลดลงเนื่องจากมีความหนืดสูง ในขณะที่การอบให้ความร้อนผง TiH<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้การขยายตัวสูงสุดของโฟมลดลง เนื่องจากการสูญเสียแก๊สบางส่วนในระหว่างการอบให้ความร้อน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อ.....*อารีฟิน หมัดแก้ว*.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....*เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย*.....

## 4970823621 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ALUMINIUM FOAM/ OXIDE/ POWDER METALLURGY/ TITANIUM HYDRIDE

AREEFEEEN MUDKAEW : EFFECTS OF HEAT-TREATED Al AND TiH<sub>2</sub> POWDERS  
ON FOAMABILITY, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTY OF Al FOAM.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D., 78 pp.

The objective of this work is to study the effect of Al and TiH<sub>2</sub> powder heat treatments on foamability, structure and compressive mechanical behavior of Al foam. Oxidation of Al powders resulted in increasing oxide contents which stabilize foam structure due to increasing bulk viscosity and decreasing surface tension. Oxidation of TiH<sub>2</sub> powders resulted in a higher decomposition temperature which leads to decreasing gas escape during foaming due to decreasing temperature mismatch between the decomposition temperature of TiH<sub>2</sub> and the melting point of Al.

Employing two oxidized powders for foam fabrication, it was found that a large foam expansion with the most uniform structure was obtained when 450°C oxidized Al powder and 400°C oxidized TiH<sub>2</sub> powder were used. Excessive oxide content (high oxidation temperature) of Al powder due to excessive oxidation temperature restrains foam expansion due to high viscosity. Excessive oxidation temperature of TiH<sub>2</sub> reduces foam expansion due to a large amount of gas loss during oxidation.

Department : ... Metallurgical Engineering....

Student's Signature.....  
*AREEFEEEN MUDKAEW*

Field of Study : ... Metallurgical Engineering ....

Advisor's Signature.....  
*SEKSAK ASAVAVISITHCHAI*

Academic Year : ...2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ของหลายๆฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย สำหรับการอุทิศตนและสละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ ที่เอาใจใส่ทั้งด้านการเรียนและการทำงานตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร อาจารย์ ดร. ปัญญาวัชร วัชยาว และดร. สมพงษ์ ศรีมโนเสาวภาคย์ ที่ให้ความรู้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนผู้จัดทำในทุกด้านด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณนายรัฐ ดันตศิริไพบูลย์ ที่ช่วยแนะนำวิธีการทดลองต่างๆ และเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านสำหรับการสร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเตรียมชิ้นงาน และขอขอบคุณศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ นางสาวอุบล สาธิตะกร ที่ช่วยเหลือในหลายๆด้าน ตลอดจน สมาชิกทุกคนในครอบครัวหมัดแก้ว ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลอันเป็นที่รักที่คอยให้กำลังใจในการสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 โฟมโลหะ.....	4
2.1.1 การนำโฟมโลหะไปประยุกต์ใช้.....	4
2.1.2 ประเภทและลักษณะของโฟมโลหะ.....	5
2.1.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ.....	5
2.1.4 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ.....	6
2.1.5 ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศ.....	6
2.2 โฟมอะลูมิเนียม.....	7
2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	8
2.4 กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีโลหะผง.....	9
2.5 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง.....	10
2.5.1 สารปล่อยแก๊ส.....	10
2.5.2 สารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม.....	11
2.5.3 การเติมอนุภาคเซรามิก.....	14
2.5.4 การผสมผง.....	15
2.5.5 การอัดขึ้นรูป Precursor .....	16
2.5.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม.....	16
2.5.7 อัตราการให้ความร้อน.....	16

2.5.8 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโพลีอะลูมิเนียม.....	17
2.5.9 การถ่ายเทความร้อนของชิ้นงาน.....	18
2.6 สมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียม.....	18
2.6.1 ลักษณะการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียม.....	18
2.6.2 การดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียม.....	20
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียม.....	20
2.7.1 ความหนาแน่นของโพลี.....	20
2.7.2 การเติมอนุภาคเซรามิก.....	22
2.7.3 ปริมาณของโพรงอากาศ.....	23
2.7.4 ขนาดของโพรงอากาศ.....	23
2.7.5 การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ.....	24
2.7.6 รูปร่างของโพรงอากาศ.....	24
2.7.7 ทิศทางของโพรงอากาศ.....	25
2.7.9 จุดบกพร่อง.....	25
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>26</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	26
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	26
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	26
3.3.1 การอบให้ความร้อนวัสดุผง.....	26
3.3.2 การผลิต Precursor.....	27
3.3.3 การผลิตโพลีอะลูมิเนียม.....	27
3.3.4 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โพลีอะลูมิเนียม.....	27
3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโพลีอะลูมิเนียม.....	28
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	29
3.4.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน DSC , TGA.....	29
3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนบรรจุในผง Al.....	29
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างโพลีด้วยวิธี Image analysis.....	30
3.4.4 การทดสอบสมบัติทางกลด้วยวิธี การทดสอบการรับแรงอัด.....	30
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>31</b>
4.1 คุณลักษณะของวัสดุ.....	31
4.1.1 รูปร่างและลักษณะของวัสดุ.....	31



4.1.2 ขนาดและความหนาแน่นของวัสดุ.....	31
4.1.3 ผลของผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อน.....	32
4.1.4 ผลของผง TiH <sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อน.....	32
4.2 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	35
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค.....	39
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	47
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ.....	47
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศ.....	51
4.5 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม.....	56
<b>บทที่ 5 วิจัยรณผลการทดลอง.....</b>	<b>58</b>
5.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al และผง TiH <sub>2</sub> .....	58
5.1.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al .....	58
5.1.2 ผลของการอบให้ความร้อนผง TiH <sub>2</sub> .....	59
5.2 ผลของการอบให้ความร้อนของผง Al และผง TiH <sub>2</sub> ต่อการขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียม.....	60
5.2.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al ต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	60
5.2.2 ผลของการอบให้ความร้อนผง TiH <sub>2</sub> ต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม....	61
5.2.3 ผลของการอบให้ความร้อนของผง Al และผง TiH <sub>2</sub> ต่อการขยายตัวของ โฟม อะลูมิเนียม.....	61
5.3 ผลของการอบให้ความร้อนของผง Al และผง TiH <sub>2</sub> ต่อโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม	62
5.3.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al ต่อโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม.....	62
5.3.2 ผลของการอบให้ความร้อนผง TiH <sub>2</sub> ต่อโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม.....	63
5.3.3 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al และผง TiH <sub>2</sub> ต่อโครงสร้าง โฟมอะลูมิเนียม.....	62
5.3.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al ต่อโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม.....	62
5.4 ผลของการอบให้ความร้อนของผง Al และผง TiH <sub>2</sub> ต่อความสามารถในการรับ แรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม.....	66
<b>บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>67</b>
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>70</b>

ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ฉ

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของผง Al และ $TiH_2$ .....	31
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณออกซิเจนบรรจุที่ผง Al .....	32
ตารางที่ 4.3 แสดงผล DSCและ TG ของผง $TiH_2$ .....	34
ตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนการขยายตัวสูงสุดของ โฟมอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ เทียบกับ โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับ ผง $TiH_2$ บริสุทธิ์.....	39
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J จาก โครงสร้างมหภาคของ โฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด.....	41
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม.....	56
ตารางที่ 1ก แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J จาก โครงสร้างมหภาคของ โฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด.....	77

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

ฎ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โฟมโลหะรูปร่างต่างๆ.....	4
รูปที่ 2.2 โพรงอากาศแบบปิดและโพรงอากาศแบบเปิด.....	5
รูปที่ 2.3 กราฟการกระจายตัวของพื้นที่โพรงอากาศและรูปตัดขวางโครงสร้างของ โพรงอากาศ.....	7
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง.....	8
รูปที่ 2.5 การขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 800 °C ที่เวลาต่างๆ.....	9
รูปที่ 2.6 แสดงกราฟ DSC ของ TiH <sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่ อุณหภูมิต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.7 แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 550 °C .....	12
รูปที่ 2.8 แสดงผลการขยายตัว เนื่องจากปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม จากการอบให้ความ ร้อนที่อุณหภูมิ 500 °C และ 550 °C .....	13
รูปที่ 2.9 แสดงผลของสัดส่วนปริมาตร SiC ขนาด 3 μm ที่อุณหภูมิ 810 °C .....	15
รูปที่ 2.10 แสดงการปล่อยแก๊สไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> ) ที่บรรยากาศต่างๆ.....	17
รูปที่ 2.11 ผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	18
รูปที่ 2.12 Stress-Strain curve ของโฟมโลหะในอุดมคติ และ Stress-Strain curve ของ โฟมโลหะที่ได้จากการทดสอบจริง .....	19
รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของ โฟมต่างชนิดกัน.....	21
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับความสามารถใน การดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม.....	21
รูปที่ 2.15 ผลของปริมาณ ของ SiC ที่ขนาด 3 μm และขนาดของ SiC ที่ 3 vol.% ที่มีต่อ ความแข็งแรงอัด ของโฟมอะลูมิเนียม AlSi7.....	22
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับความหนาผนังโพรงอากาศ.....	23
รูปที่ 2.17 แสดง a) ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงอัดกับการกระจายตัวของขนาด โพรงอากาศ b) ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับพลังงานกับการกระจายตัวของ ขนาดโพรงอากาศ และ c) การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ.....	24
รูปที่ 2.18 แสดงผลของรูปร่างโพรงอากาศต่อความแข็งแรงอัด.....	25
รูปที่ 3.1 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโฟมอะลูมิเนียมเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค.....	28

รูปที่ 3.2 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโฟมอะลูมิเนียมเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค.....	29
รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของวัสดุ.....	31
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟการทดสอบทางความร้อนของ $TiH_2$ .....	33
รูปที่ 4.3 กราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง $TiH_2$ บริสุทธิ์ และผง $TiH_2$ ที่ผ่านการอบให้ความร้อน.....	35
รูปที่ 4.4 กราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ $450^{\circ}C$ กับ ผง $TiH_2$ บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน เปรียบเทียบ กับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับ ผง $TiH_2$ บริสุทธิ์.....	36
รูปที่ 4.5 กราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ กับ ผง $TiH_2$ บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน เปรียบเทียบ กับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับ ผง $TiH_2$ บริสุทธิ์.....	37
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	38
รูปที่ 4.7 ภาพโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด.....	40
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ (a) ขนาดเฉลี่ย, (b) ความกลมเฉลี่ย, (c) ปริมาณของโพรงอากาศ.....	43
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ (a) ปริมาณของโพรงอากาศ, (b) % สัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศ ที่ขนาดของโพรงอากาศต่างๆ.....	45
รูปที่ 4.10 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ ผง Al บริสุทธิ์กับผง $TiH_2$ แบบต่างๆ.....	48
รูปที่ 4.11 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $450^{\circ}C$ กับผง $TiH_2$ แบบต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.12 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ กับผง $TiH_2$ แบบต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.13 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ ผง Al ที่มีปริมาณออกซิเจนบรรจุแตกต่างกัน.....	51
รูปที่ 4.14 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ ผง Al บริสุทธิ์กับผง $TiH_2$ แบบต่างๆ.....	52
รูปที่ 4.15 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $450^{\circ}C$ กับผง $TiH_2$ แบบต่างๆ.....	53

รูปที่ 4.16 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพลีเอทิลีนที่ใช้ ผง AI ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH <sub>2</sub> แบบต่างๆ.....	54
รูปที่ 4.17 รูปเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของ โพลีเอทิลีนที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน.....	55
รูปที่ 4.18 กราฟการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีน.....	56
รูปที่ 1ก แสดงลักษณะของหน้าตัดโปรแกรม Image J 1.36b.....	73
รูปที่ 2ก แสดงผลวิเคราะห์รูปโครงสร้างโพลีเอทิลีนด้วยโปรแกรม Image J.....	74



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โฟมโลหะ เป็นโลหะที่มีโครงสร้างไม่เหมือนโลหะทั่วไป โดยโครงสร้างของโฟมโลหะมีลักษณะเป็นรูพรุน ประกอบด้วยโพรงอากาศจำนวนมาก มีเนื้อโลหะอยู่ประมาณ 5-25 vol.% หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โฟมโลหะประกอบด้วยอากาศ 75-95 vol.% ทำให้มีน้ำหนักเบามาก โฟมโลหะยังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานในระหว่างการอัดได้สูงและมีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ โฟมโลหะบางชนิด เช่น โฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตให้มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ ทำให้สามารถลอยน้ำได้ นอกจากนี้โฟมโลหะยังมีสมบัติเด่นในเรื่องความแข็ง และความแกร่ง ซึ่งต่างจากโฟมพอลิเมอร์และโฟมเซรามิก

การผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดวิธีหนึ่งก็คือ กรรมวิธีโลหะผง (Powder metallurgy) การผสมผงโลหะเข้ากับ สารปล่อยแก๊ส (Foaming agent) เมื่อส่วนผสมได้รับความร้อนสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลว สารปล่อยแก๊สจะสลายตัวและให้แก๊สออกมาซึ่งจะสร้างโพรงอากาศจำนวนมากในเนื้อโลหะ ปฏิกิริยาการเกิดโฟมในกรรมวิธีโลหะผงนั้น เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาเพียงไม่กี่นาที ในขณะที่โฟมเกิดการขยายตัวนั้น จะเกิดการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานโฟม เนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก (Drainage) และเกิดการรวมตัวกันของโพรงอากาศในโฟม (Cell coalescence) ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้โครงสร้างโฟมโดยรวมไม่มีความสม่ำเสมอ เป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลของโฟมอะลูมิเนียมไม่ดีไปด้วย

ในการสร้างเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม ที่ผลิตจากกรรมวิธีโลหะผง พบว่าสารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม ( $Al_2O_3$ ) ที่อยู่บนผิวของผงอะลูมิเนียมสามารถเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพให้แก่โฟม โดยผิวออกไซด์จะแตกหัก เนื่องจากแรงเฉือนในระหว่างการอัดขึ้นรูปของ Precursor เมื่อผิวออกไซด์ที่แตกหักนี้อยู่ในอะลูมิเนียมที่หลอมเหลว ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับอนุภาคเซรามิก ช่วยลดแรงดึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทำให้การขยายตัวดีขึ้น และช่วยขัดขวางการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานโฟม โดยที่จะเพิ่มความหนืด (Viscosity) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียม และยังช่วยลดการรวมตัวกันของโพรงอากาศในโครงสร้างของโฟม ทำให้โฟมมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น

สำหรับสารปล่อยแก๊ส โดยทั่วไปจะนิยมใช้ไทเทเนียมไฮไดรด์ ( $TiH_2$ ) เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของ  $TiH_2$  อยู่ที่ประมาณ  $400-450^{\circ}C$  ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมที่สุด ซึ่งอยู่ที่ประมาณ  $660^{\circ}C$  เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบไฮไดรด์ชนิดอื่น แต่เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของ  $TiH_2$  ยังอยู่ต่ำกว่า จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ทำให้การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมยังอยู่ในสถานะของแข็ง ทำให้เกิดการร้าวและการแตกของโครงสร้างโฟมและแก๊สส่วนหนึ่งสามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโฟม (Foamability) ของ Precursor ลดลง จึงมีการปรับปรุง  $TiH_2$  โดยการนำไปอบให้ความร้อนในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ  $TiH_2$  เปลี่ยนไป เนื่องจากออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับ  $TiH_2$  เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ชั้นที่ผิว ซึ่งชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของ  $TiH_2$  เพิ่มขึ้น

ในปัจจุบันการผลิตโฟมอะลูมิเนียม ยังไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากคุณภาพของโฟมส่วนใหญ่ยังต่ำอยู่ อันเป็นผลมาจากโครงสร้างภายในที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดของเสียจำนวนมาก เป็นผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงและพัฒนา ตลอดจนเพื่อเพิ่มความเข้าใจ การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผงให้มีเสถียรภาพและคุณภาพที่สูงขึ้น โดยใช้ประโยชน์จากการเพิ่มปริมาณออกไซด์ที่ผิวของผงอะลูมิเนียมและการทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของ  $TiH_2$  เพื่อชะลอการปล่อยแก๊สที่เกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลรวมที่ได้จากการเพิ่มปริมาณออกไซด์ที่เหมาะสม และการอบให้ความร้อนสารปล่อยแก๊สต่อการขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่เพิ่มปริมาณออกไซด์และผสมสารปล่อยแก๊สที่ผ่านการอบให้ความร้อน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้รับ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมอยู่ที่  $800^{\circ}C$  และบรรยากาศที่ใช้ภายในเตาคือ อากาศ
- 1.3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบให้ความร้อนอะลูมิเนียม คือ  $450, 500^{\circ}C$
- 1.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบให้ความร้อน  $TiH_2$  คือ  $400, 450, 500^{\circ}C$



#### 1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.4.1 การอบให้ความร้อนผงอะลูมิเนียม ในผงในถาดสแตนเลสและเกลี่ยให้ผงกระจายตัวแบบหลวมๆ เพื่อให้ผงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง แต่อาจมีผงบางส่วนที่มีปริมาณออกซิเจนที่บรรจุไม่เท่ากัน
- 1.4.2 การวัดความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียม ด้วยวิธี Archimedes' densitometry โดยใช้วาสลีนทาที่บริเวณรอบนอกของโฟมอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำซึมเข้าไป อาจมีน้ำบางส่วนซึมเข้าไปในชิ้นงานบ้าง

#### 1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

โฟมโลหะ (Metal foams), กรรมวิธีโลหะผง (Powder metallurgy), การอบให้ความร้อน (Heat treatment), ผงอะลูมิเนียม (Al powder), ไทเทเนียมไฮไดรด์ ( $\text{TiH}_2$ ),

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง
- 1.6.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม (Al) และปริมาณออกไซด์ของไทเทเนียมไฮไดรด์ ( $\text{TiH}_2$ ) ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่เหมาะสม ต่อพฤติกรรมของโฟมอะลูมิเนียม
- 1.6.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางความร้อนของผง Al และ  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านและไม่ผ่านการอบให้ความร้อน
- 1.6.4 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม
- 1.6.5 ปรับปรุงและพัฒนา การผลิตโฟมอะลูมิเนียม ด้วยวิธีโลหะผงให้มีเสถียรภาพ และคุณภาพที่สูงขึ้น

## บทที่ 2

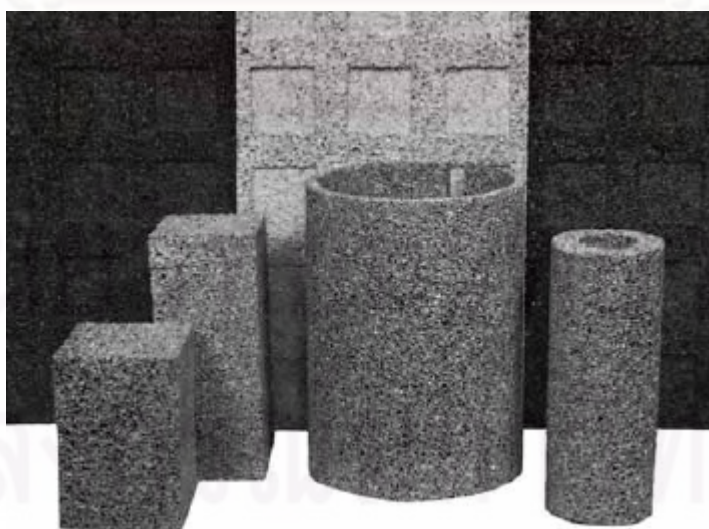
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะ เป็นโลหะที่มีโครงสร้างลักษณะเป็นรูพรุน มีโพรงอากาศจำนวนมาก มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันในปริมาตรเท่ากัน โฟมโลหะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูง นอกจากนี้โฟมโลหะยังมีสมบัติเด่นในเรื่องความแกร่ง (Toughness) ซึ่งต่างจากโฟมพอลิเมอร์ และโฟมเซรามิก

##### 2.1.1 การนำโฟมโลหะไปประยุกต์ใช้

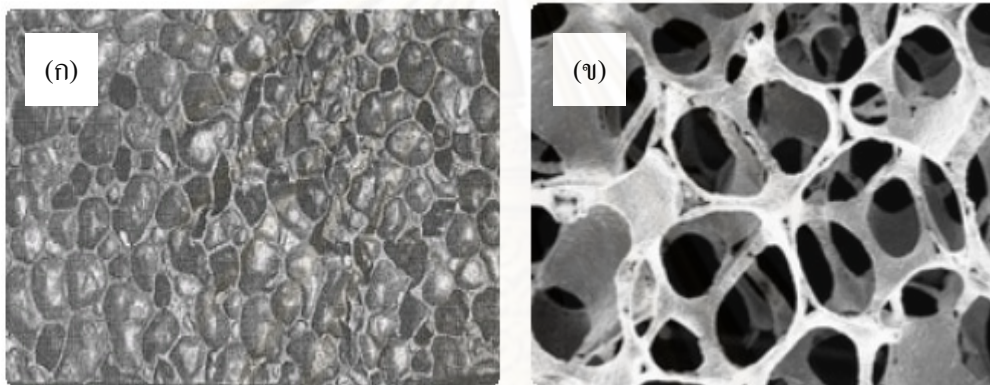
ความต้องการในการนำโฟมโลหะมาประยุกต์ใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากโฟมโลหะมีจุดเด่นในเรื่องความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทก ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตเป็นวัสดุรับแรงกระแทก โฟมโลหะมีความหนาแน่นน้อย แต่มีสมบัติเด่นในเรื่องความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) และความแข็งแรงแตกหัก (Fracture strength) สูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นชิ้นส่วนตรงกลางในโครงสร้างแบบแซนด์วิช ที่ต้องการวัสดุน้ำหนักเบา และสามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้ดี โครงสร้างของโฟมโลหะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากทำให้สามารถป้องกันเสียงได้ดี จึงมีการประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุดูดซับเสียง โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของโฟมโลหะทำให้มันมีพื้นที่ผิวมาก สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี เหมาะที่จะประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้โฟมโลหะมีโครงสร้างที่แข็งแรง และมีน้ำหนักเบา จึงเหมาะกับการใช้กับงานด้านสถาปัตยกรรม



รูปที่ 2.1 โฟมโลหะรูปร่างต่างๆ [1]

### 2.1.2 ประเภทและลักษณะของโฟมโลหะ

โฟมโลหะแบ่งได้เป็นสองประเภท แยกตามโครงสร้างของโครงอากาศ ประเภทแรกเป็นโฟมโลหะที่มีโครงอากาศแบบปิด (Closed-cell) ประเภทที่สอง โฟมโลหะที่มีโครงอากาศแบบเปิด (Open-cell) โครงสร้างของโครงอากาศ (Cell) ของโฟมโลหะ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของความพรุน (Porosity) ในโฟมโลหะ โดยโครงอากาศแบบปิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับมีเยื่อหุ้มปกคลุมรอบโครงอากาศ สำหรับโครงอากาศแบบเปิดนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับร่างแหต่อกันในด้านข้างของโครงอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยคุณสมบัติของโฟมโลหะจะขึ้นอยู่กับรูปแบบและโครงสร้างโครงอากาศของโฟม



รูปที่ 2.2 (ก) โครงอากาศแบบปิด และ (ข) โครงอากาศแบบเปิด [2]

### 2.1.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ

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

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

โดยที่  $\rho_f$  คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะและ  $\rho_s$  คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งความหนาแน่นของโฟมโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่ต่างกัน เนื่องมาจากสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน

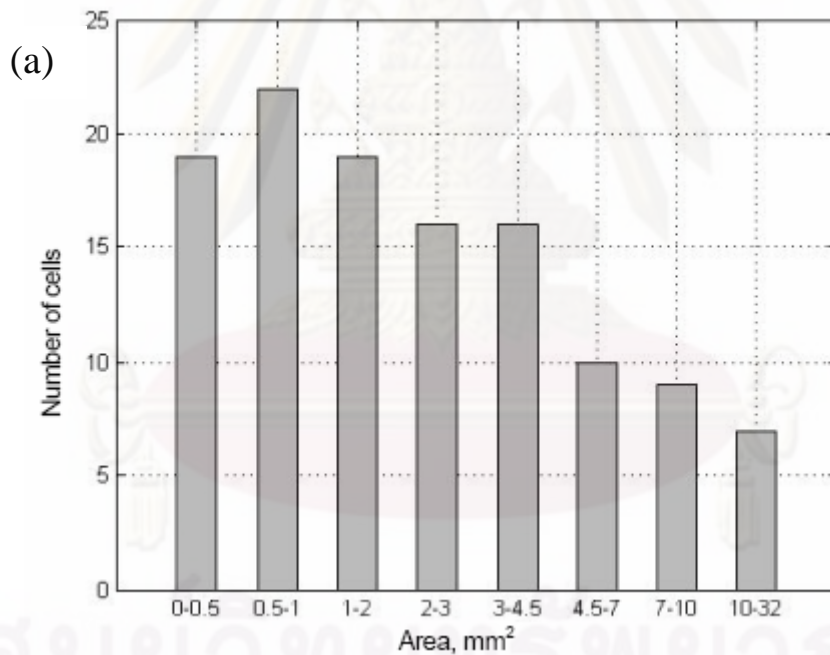
### 2.1.4 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ

ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ (P) ซึ่งมีหน่วยเป็น % คือปริมาณความหนาแน่นสมบูรณ์ลบด้วยความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยปริมาณของโพรงอากาศ สามารถแสดงได้ใน สมการ 2.2

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

### 2.1.5 ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ

ขนาดและรูปร่างรวมถึงการกระจายตัวของโพรงอากาศมีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ โดยที่วิธีการผลิตที่แตกต่างกันนั้นส่งผลให้เกิดขนาดและรูปร่างโพรงอากาศที่ต่างกัน รวมถึง ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่มีความแตกต่างกันด้วย นั้นยังส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และความแข็งแรง (Strength) แตกต่างกันไป ซึ่งมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงาน (Size effect) ทำให้มีผลอย่างมากต่อการออกแบบและทดสอบวัสดุ รูปร่างของโพรงอากาศจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ แต่ขนาดของโพรงอากาศก็ยังคงเป็นตัวแปรสำคัญและมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะ



(b)



รูปที่ 2.3 (a) กราฟการกระจายตัวของพื้นที่โพรงอากาศ และ (b) รูปตัดขวางโครงสร้างของโพรงอากาศ (SiC 2.5 wt%,  $p = 370$  MPa,  $T = 800$  °C) [3]

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ขนาดและรูปร่างการกระจายตัวของโพรงอากาศ ที่แตกต่างกันมีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะแตกต่างกันด้วยโดยบริเวณที่ความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมสูง และมีรูปร่างการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอ ก็จะส่งผลให้โฟมอะลูมิเนียมสามารถรับแรงอัดได้มาก ตลอดจนมีความแข็งแรงที่สูงกว่าบริเวณที่ความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมต่ำและมีรูปร่างการกระจายตัวของโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ

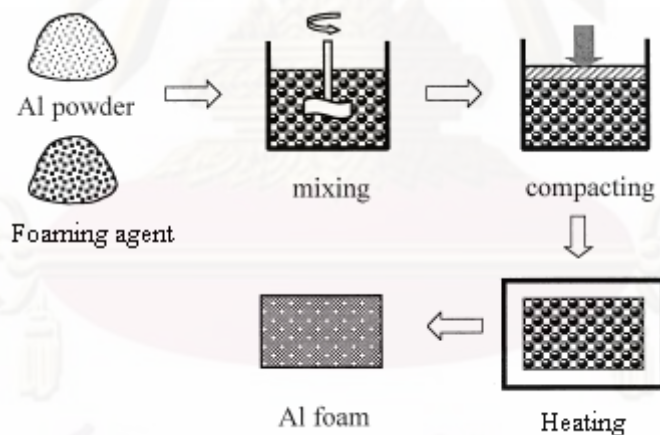
## 2.2 โฟมอะลูมิเนียม

โฟมอะลูมิเนียม คือ โฟมโลหะที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุพื้นในการผลิตโฟม โดยโฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ประกอบไปด้วยโพรงอากาศที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม โฟมอะลูมิเนียมมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูงในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทก ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง จึงมีการประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุดูดซับเสียง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับตกแต่ง และใช้งานด้านสถาปัตยกรรม และประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ โดยการควบคุมขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมให้ได้คุณสมบัติทางกลที่ต้องการ

### 2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

วิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้หลายวิธีโดยวิธีที่นิยมในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ โดยแบ่งตามสถานะของอะลูมิเนียมในกระบวนการผลิต คือ 1. การผลิตโฟมจากสถานะของเหลว และ 2. การผลิตโฟมจากสถานะของแข็ง

วิธีที่นิยมใช้กันมากวิธีหนึ่งก็คือ กรรมวิธีโลหะผง (Powder metallurgy) ซึ่งเป็นการผลิตโฟมจากสถานะของแข็ง การผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับ สารปล่อยแก๊ส (Foaming agent) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น  $MgH_2$ ,  $ZrH_2$ ,  $TiH_2$  โดยทั่วไปจะนิยมใช้ สารปล่อยแก๊ส เป็นไทเทเนียมไฮไดรด์ ( $TiH_2$ ) และจะใช้ในปริมาณระหว่าง 0.6-1.0 wt.% ซึ่งเพียงพอต่อการสร้างโครงอากาศภายในโฟม การผสมผงต้องทำให้เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด และนำไปอัดขึ้นรูป ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วจะเรียกว่า “Foamable Precursor” หรือ เรียกสั้นๆว่า “Precursor” การอัดขึ้นรูปนั้นสามารถทำได้หลายแบบ โดยต้องการให้Precursor มีความหนาแน่นสูงกว่า 99% จากนั้นนำ Precursor ไปใส่ในแม่พิมพ์และนำไปเข้าเตาอบ เมื่อให้ความร้อนแก่ Precursor จนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม  $TiH_2$  ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ  $400-450\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะปล่อยแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ซึ่งจะสร้างโครงอากาศใน Precursor ที่หลอมเหลวทำให้เกิดการขยายตัวขึ้น และจะได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูพรุนแบบปิด (Closed cells) การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง มีขั้นตอนเป็นไปตามรูปที่ 2.4

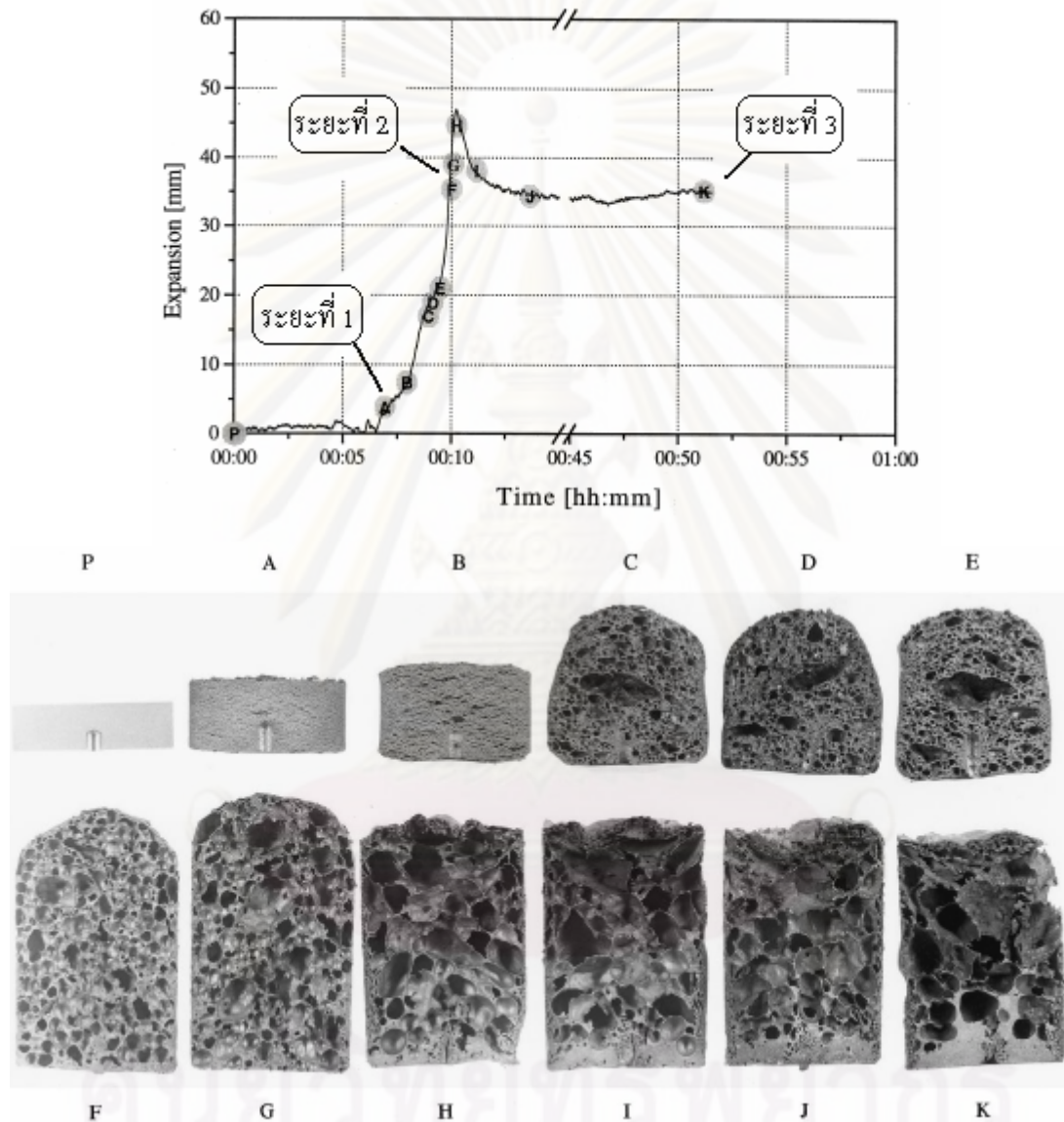


รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง [4]

วิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผงมีข้อดีคือ สามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างที่ต้องการ และมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากอะลูมิเนียมเหลว ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือ มีค่าใช้จ่ายในส่วนของผงโลหะที่สูง และการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ทำได้ยาก

## 2.4 กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง

เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาหนึ่ง Precursor จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งกลไกเหล่านี้จะส่งผลต่อรูปร่างของ Precursor เมื่อขยายตัวเป็นโฟมอะลูมิเนียม ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ระยะเวลาหลัก ดังรูปที่ 2.5 แสดงการขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.5 การขยายตัวและโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 800 °C ที่เวลาต่างๆ [5]

**ระยะที่ 1** - เริ่มเกิดโพรงอากาศ ขึ้นภายใน Precursor (Initiation and Evolution of porosity) ในขั้นตอนนี้จะเริ่มเกิดการสลายตัวของสารปล่อยแก๊ส และให้แก๊ส  $H_2$  ออกมาและจะเริ่มเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กขึ้น โพรงอากาศนี้จะมีรูปร่างขึ้นอยู่กับวิธีการในการขึ้นรูป Precursor ในขั้นตอนนี้ขนาดของ Precursor จะมีการขยายตัวขึ้นประมาณ 0-30%

**ระยะที่ 2-** การโตขึ้นของโพรงอากาศ (Pore growth) ในขั้นตอนนี้จะยังคงมีการเริ่มเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่ และโพรงอากาศที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนหนึ่งเกิดจากปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของ สารปล่อยแก๊ส เพิ่มมากขึ้น และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ รูปร่างของโพรงอากาศจะเริ่มเปลี่ยนจากแถบยาวในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัด ไปเป็นโพรงอากาศที่มีลักษณะกลม เมื่อเวลาผ่านไป โพรงอากาศที่มีรูปร่างกลมจะขยายตัวขึ้นจนกระทั่งไม่มีพื้นที่เพียงพอที่จะเกิดเป็นโพรงอากาศที่มีรูปร่างกลมได้อีก และจะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ในขั้นตอนนี้ขนาดของ Precursor จะมีการขยายตัวขึ้นประมาณ 50-400%

**ระยะที่ 3** - การยุบตัวของโครงสร้างโฟม (Collapse) หลังจากที่โพรงอากาศขยายตัวมากที่สุดและการสลายตัวของสารปล่อยแก๊สหยุดลง จะเกิดการยุบตัวของโฟมขึ้นทำให้ได้โพรงอากาศที่มีรูปร่างผิดปกติ กลไกหลักในการเกิดการยุบตัวของโฟม คือ Drainage และ Cell coalescence กลไก Drainage เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงโลก และผลของแรงที่มาจากรูเล็ก (Capillary force) ทำให้อะลูมิเนียมเหลวไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำทำให้บริเวณฐานของโฟมมีลักษณะเป็นชั้นหนาของอะลูมิเนียม การเกิด Cell coalescence เกิดจากการที่โพรงอากาศ 2 โพรง รวมตัวกันเกิดเป็นโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การรวมตัวของโพรงอากาศนี้เป็นผลมาจากการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศ

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง

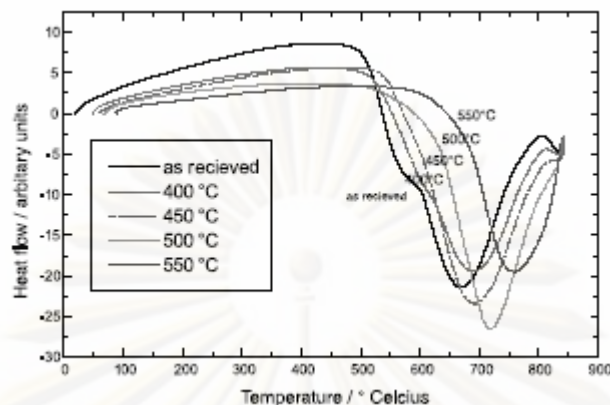
ปัจจัยต่างๆที่มีผลในการผลิต โฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง มีอยู่หลายปัจจัย เช่น

### 2.5.1 สารปล่อยแก๊ส

สารปล่อยแก๊ส (Foaming agent) โดยทั่วไปจะนิยมใช้ผง  $TiH_2$  เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของผง  $TiH_2$  อยู่ที่ประมาณ  $400-450\text{ }^{\circ}C$  ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ซึ่งอยู่ที่ประมาณ  $660\text{ }^{\circ}C$  มากที่สุดหากเปรียบเทียบกับสารประกอบไฮโดรด์ชนิดอื่น แต่เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของผง  $TiH_2$  ยังอยู่ต่ำกว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ทำให้การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมยังอยู่ในสถานะของแข็ง ทำให้เกิดการแตกของโครงสร้างโฟมในขณะที่ขยายตัว และแก๊สส่วนหนึ่งสามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโฟม (Foamability) ของ Precursor ลดลง จึงมีการปรับปรุง ผง  $TiH_2$  โดยการนำไปอบให้ความร้อนในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ  $TiH_2$  เปลี่ยนไป ผง  $TiH_2$  ที่อบให้ความร้อนในบรรยากาศที่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดเฟส Oxyhydride และเมื่อดำเนินการต่อไปจะเกิดเฟส  $Ti_3O$  และ  $TiO_2$  เนื่องจากออกซิเจนจะทำปฏิกิริยา



กับ  $TiH_2$  เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ขึ้น ซึ่งชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของ  $TiH_2$  เพิ่มขึ้น [6,15]



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟ DSC ของ  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่ อุณหภูมิต่างๆ [6]

จากรูปที่ 2.6 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของอุณหภูมิการสลายตัวของ  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน โดยที่ปฏิกิริยาคูดความร้อนซึ่งเป็นสิ่งบ่งบอกการสลายตัวของ  $TiH_2$  เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของเอนโทรปี จากกราฟ DSC อุณหภูมิการสลายตัวของ  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ทั้ง  $400^{\circ}C$ ,  $450^{\circ}C$ ,  $500^{\circ}C$  และ  $550^{\circ}C$  จะอยู่สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ  $TiH_2$  ที่ไม่ผ่านการอบให้ความร้อน ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ซึ่งอยู่ที่ประมาณ  $660^{\circ}C$  และเป็นช่วงของอุณหภูมิ Solidus/Liquidus ซึ่งเป็นช่วงที่การขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมที่ดีที่สุด

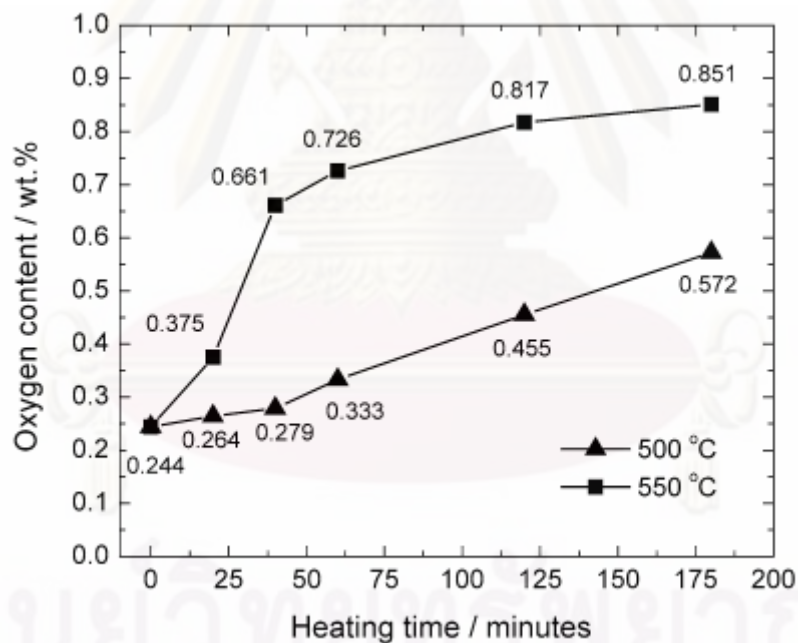
### 2.5.2 สารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม

ผงอะลูมิเนียมที่ผลิตโดยกรรมวิธีการทำละออง (Atomization) มีออกซิเจนบรรจุอยู่ที่ผงอะลูมิเนียม โดยที่ปริมาณออกซิเจนที่บรรจุอยู่นั้นขึ้นอยู่กับบรรยากาศที่ใช้ในการผลิต เช่น บรรยากาศที่ใช้คืออากาศจะทำให้มีออกซิเจนบรรจุประมาณ 0.4 wt.% แต่ถ้าบรรยากาศที่ใช้คือไนโตรเจนจะทำให้มีออกซิเจนบรรจุประมาณ 0.1 wt.% โดยออกซิเจนที่บรรจุสันนิฐานได้เป็นชั้นออกไซด์บนผิวของผงอะลูมิเนียม [7,16]

สารประกอบออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ที่อยู่บนผิวของผงอะลูมิเนียมซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก และอยู่ในสถานะของแข็ง สามารถเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพให้แก่โพม โดยผิวออกไซด์จะแตกหัก เนื่องจากแรงเฉือนในระหว่างการอัดขึ้นรูปของ Precursor ออกไซด์ที่พบในโพมมีหลายลักษณะเช่น ฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ มีความหนาประมาณ 10-50 nm กลุ่มออกไซด์ขนาดเล็ก (Small oxide clusters) ออกไซด์มีลักษณะเกาะกลุ่มกันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ  $1.5 \mu m$  ฝังลงบนผิวของผง Al โดยมีความหนาของชั้นผิวออกไซด์

ประมาณ 500 nm กลุ่มอนุภาคออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network particle) คือการรวมตัวกันของฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) หรือกลุ่มออกไซด์ขนาดเล็ก (Small oxide clusters) เป็นกลุ่มก้อนมีลักษณะคล้ายอนุภาคของแข็ง แต่มีสัดส่วนโดยปริมาตรประมาณ 30-35 % เกิดขึ้นเนื่องจากออกไซด์เกิดการแตกหักเนื่องจากความเค้นเฉือนในระหว่างการอัดขึ้นรูป Precursor และไหลเป็นอิสระในน้ำโลหะและรวมตัวกันเนื่องจากการเกาะยึดทางกล (Mechanical interlocking) กลุ่มอนุภาคออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network particle) นี้หากอยู่โดดเดี่ยวอาจเรียกว่าเป็น กลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) ก็ได้ โดยมีขนาดประมาณ 50-100  $\mu\text{m}$  ในขณะที่ถ้ามีปริมาณออกไซด์ที่สูงขึ้นหรือมีกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) รวมตัวกันมากขึ้น ออกไซด์จะมีลักษณะเชื่อมต่อกัน (Oxide network) [7,16,18] เป็นผลให้มีลักษณะคล้ายกับอนุภาคเซรามิก ช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทำให้การขยายตัวดีขึ้น และช่วยขัดขวางการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานโฟม โดยที่จะเพิ่มความหนืด (Viscosity) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียม และยังช่วยลดการรวมตัวกันของโพรงอากาศในโครงสร้างของโฟม ทำให้โฟมมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น

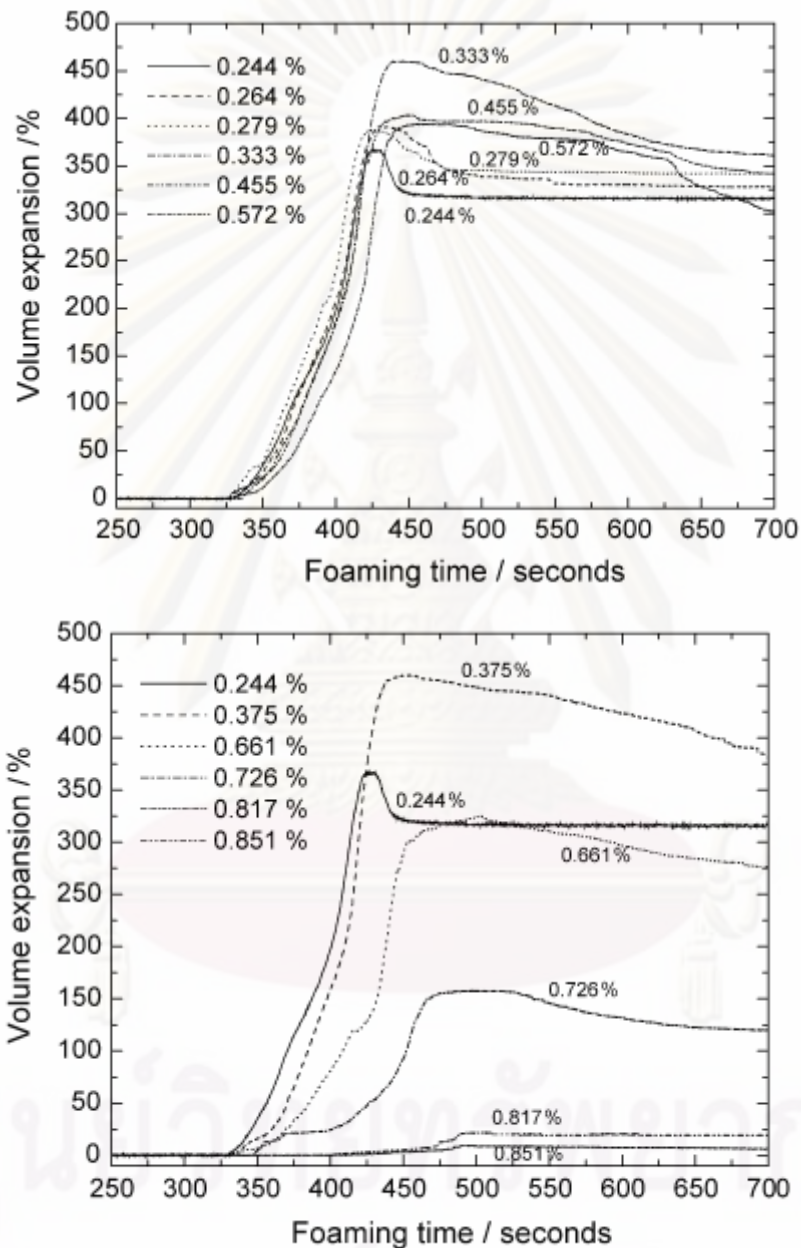
เมื่อมีการอบให้ความร้อนโดยที่เพิ่มอัตราการไหลของออกซิเจน ทำให้ปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.7 แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 550 °C [7]

จากรูปที่ 2.7 แสดงผลปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 500 °C ในช่วง 50 นาทีแรก อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะเพิ่มขึ้น

คงที่เมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 180 นาที และที่อุณหภูมิ 550 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมจะเพิ่มขึ้นคงที่ตั้งแต่เริ่มต้นไปจนถึง 180 นาที



รูปที่ 2.8 แสดงผลการขยายตัว เนื่องจากการเพิ่มปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม จากการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 °C และ 550 °C [7]

จากรูปที่ 2.8 พบว่าถ้ามีปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม น้อยกว่า 0.3 wt.% การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมจะมีขนาดพอประมาณ เนื่องจากปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมมีน้อย ทำให้

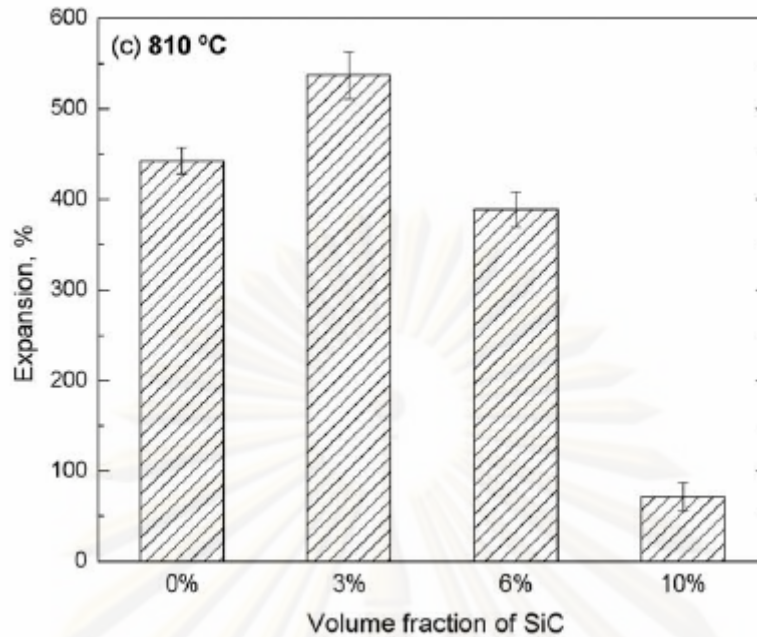
การขัดขวางน้ำอะลูมิเนียมไหลออกไปที่ฐานโพลีเมอร์น้อย เป็นผลให้น้ำอะลูมิเนียมไหลออกไปที่ฐานโพลีเมอร์อย่างรวดเร็ว ทำให้ชั้นโพลีเมอร์ที่ฐานโพลีเมอร์หนา และโครงสร้างโพลีเมอร์จะพังอย่างรวดเร็ว อีกทั้งโครงสร้างโพลีเมอร์มีความหนาและโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้โครงสร้างโพลีเมอร์มีเสถียรภาพ

ถ้ามีปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมประมาณ 0.3-0.6 wt.% การขยายตัวของโพลีเมอร์จะเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างโพลีเมอร์จะพังช้าลง ชั้นโพลีเมอร์ที่ฐานโพลีเมอร์ลดลง Drainage และการรวมกันของโพรงอากาศลดลง และโครงสร้างโพลีเมอร์ที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งชิ้นงาน ทำให้เสถียรภาพของโพลีเมอร์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมประมาณ 0.3-0.6 wt.% จึงเป็นปริมาณที่ดีที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพของการโพลีเมอร์โดยใช้การเพิ่มปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียม

ถ้ามีปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมมากกว่า 0.6 wt.% โครงสร้างโพลีเมอร์มีเสถียรภาพสูง แต่อัตราการขยายตัวของโพลีเมอร์ช้ามาก เนื่องจากปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมมีมากเกินไป ทำให้น้ำอะลูมิเนียมไหลออกมีความหนืดสูง และการบางลงของผนังโพรงอากาศลดลง เป็นผลให้ผนังโพรงอากาศมีความขรุขระ ทำให้เกิด  $H_2$  สามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโพลีเมอร์ของ Precursor ลดลงในขณะที่ใช้เวลานานในการขยายตัว เป็นผลให้แรงดันแก๊ส  $H_2$  ไม่เพียงพอในการโพลีเมอร์ การขยายตัวของโพลีเมอร์จึงต่ำ

### 2.5.3 การเติมอนุภาคเซรามิก (Ceramic particle addition)

อนุภาคเซรามิกที่เติมเข้าไปในการผลิตโพลีเมอร์อะลูมิเนียมจะมีผลต่อแรงดึงผิวและความหนืดของอะลูมิเนียมเหลวในขณะที่ทำการผลิตโพลีเมอร์ โดยอนุภาคเซรามิกจะขัดขวางการไหลของโลหะไหลออกจึงส่งผลให้ ความหนืดเพิ่มขึ้นการไหลของน้ำโลหะไปที่ฐานโพลีเมอร์ลดลง นอกจากนี้ อนุภาคเซรามิกยังช่วยเพิ่มความหนืดให้กับผนังโพรงอากาศ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปียก (Wettability) ของอนุภาคที่เติมลงไป ความสามารถในการเปียกทำให้พลังงานอิสระหรือแรงดึงผิวลดลง หากมีแรงดึงผิวที่สูงจะทำให้อนุภาคไม่ยึดเกาะกับอะลูมิเนียมในบริเวณที่เป็นของเหลว จึงไม่ช่วยลดความหนืด อนุภาคเซรามิกที่อยู่ระหว่างรอยต่อของเหลวและแก๊สยังช่วยทำให้ความแตกต่างของความดัน Capillary ระหว่างผนังโพรงอากาศและ Plateau border ลดลง ส่งผลให้เพิ่มความหนืดผิว ความโค้งของผนังโพรงอากาศลดลง การบางลงของผนังโพรงอากาศลดลง ผนังโพรงอากาศแข็งแรงขึ้น ขนาดและสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคเซรามิก ยังมีผลต่อโครงสร้างผนังโพรงอากาศและการไหลของน้ำโลหะไปที่ฐานโพลีเมอร์ [8]



รูปที่ 2.9 แสดงผลของสัดส่วนปริมาตร SiC ขนาด 3  $\mu\text{m}$  ที่อุณหภูมิ 810  $^{\circ}\text{C}$  [8]

จากรูปที่ 2.9 แสดงผลที่ได้ เมื่อผสม SiC ขนาด 3  $\mu\text{m}$  โดยมีการขยายตัวสูงสุดที่ 3 vol.% ซึ่งเป็นขนาดและปริมาณของอนุภาค SiC ที่เหมาะสมที่สุด โดยที่หากมีปริมาณอนุภาค SiC น้อยเกินไป เป็นผลให้น้ำอะลูมิเนียมไหลอมเหลวไหลไปที่ฐานโฟมอย่างรวดเร็วและโครงสร้างโฟมจะพังอย่างรวดเร็ว และถ้าหากมีปริมาณอนุภาค SiC มากเกินไป เป็นผลให้น้ำอะลูมิเนียมไหลอมเหลวมีความหนืดสูง และการบางลงของผนังโพรงอากาศลดลง เป็นผลให้ผนังโพรงอากาศมีความขรุขระ ทำให้แก๊ส  $\text{H}_2$  สามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโฟมของ Precursor ลดลง นอกจากนี้ขนาด ปริมาณ และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่เติมลงในโฟมอะลูมิเนียมยังมีผลต่อเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมด้วย โดยส่งผลต่อกลไกในการเพิ่มความหนืดเชิงปริมาตร (Bulk viscosity) ของโฟม การเพิ่มขึ้นของ Bulk viscosity จะช่วยลดการเกิด Drainage และการบางลงของผนังโพรงอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถยับยั้งการเกิดความแตกต่างของความหนาแน่น และการขยายขึ้นของโพรงอากาศซึ่งเกิดจากการหนีขนาดของผนังโพรงอากาศที่บางลงได้

#### 2.5.4 การผสมผง

การผสมผงเป็นปัจจัยหนึ่ง โดยต้องทำให้เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด (Homogeneous mixing) เพื่อ โครงสร้างโฟมที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งชิ้นงาน หากการผสมผงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะทำให้ขนาดและรูปร่างรวมถึงการกระจายตัวของโพรงอากาศมีความแตกต่างกันใน Precursor ส่งผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

### 2.5.5 การอัดขึ้นรูป Precursor

การอัดขึ้นรูป Precursor นั้น มีหลายวิธี โดยหลักในการเลือกวิธีอัดนั้น ขึ้นอยู่กับความสะดวกของแต่ละวิธี โดยที่พบว่าความหนาแน่นของ Precursor จะต้องมีความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) ไม่ต่ำกว่า 94% จึงจะทำให้เกิดการขยายตัวได้เนื่องจากที่ความหนาแน่นทางทฤษฎี 94% นั้นเป็นความหนาแน่นที่ช่องว่างในชิ้นงานที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected porosities) เปลี่ยนไปเป็นช่องว่างที่ไม่เชื่อมต่อกัน (Closed porosities) อย่างไรก็ตามพบว่าเพื่อให้เกิดการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่คืนนั้น จำเป็นที่จะต้องขึ้นรูป Precursor ให้มีความหนาแน่นทางทฤษฎีไม่น้อยกว่า 99% ถ้าความหนาแน่นของ Precursor ไม่เพียงพอจะทำให้มีรูพรุนเชื่อมต่อกันอยู่ใน Precursor เป็นจำนวนมากส่งผลให้ในระหว่างการอบเพื่อให้เกิดโฟมนั้น  $H_2$  ที่เกิดจากการสลายตัวของสารปล่อยแก๊ส สามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโฟม (Foamability) ของ Precursor ลดลง เมื่อเพิ่มแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป Precursor มากขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของ Precursor สูงขึ้นส่งผลให้การขยายตัวของ Precursor ในขั้นตอนการอบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูป จะทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างผงโลหะเพิ่มมากขึ้นและเกิดการเชื่อมติดกันแบบเย็นของผงมากขึ้น (Cold welding) ส่งผลให้แก๊ส  $H_2$  แพร่ผ่านได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ที่เกิดขึ้นน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูป ยังช่วยเพิ่มความเสถียรของโฟม (Stability) มากขึ้น อันเป็นผลมาจากการแตกออกของชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวของผงอะลูมิเนียม ซึ่งฟิล์มออกไซด์ที่แตกออกนั้นจะมีส่วนช่วยในการป้องกันการยุบตัวของโฟม

### 2.5.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม

อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมมีผลต่อกระบวนการผลิตโฟมเป็นอย่างมาก โดยที่ถ้าอุณหภูมิสุดท้ายในการผลิตโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิ Solidus ของโลหะผสมแล้ว การขยายตัวที่เกิดขึ้นจะเป็นเพียงการขยายตัวในสถานะของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอยู่ในช่วงของ Solidus/Liquidus จะสามารถพบการเกิดโฟมได้ และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงมากขึ้นจะทำให้เกิดการสลายตัวของ  $TiH_2$  มากขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น การขยายตัวของโฟมในขั้นต้นนั้นจะมีลักษณะของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การขยายตัวสูงมากขึ้น และที่อัตราการขยายตัวสูงจะเกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ของโพรงอากาศมากขึ้นและโพรงอากาศจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศ

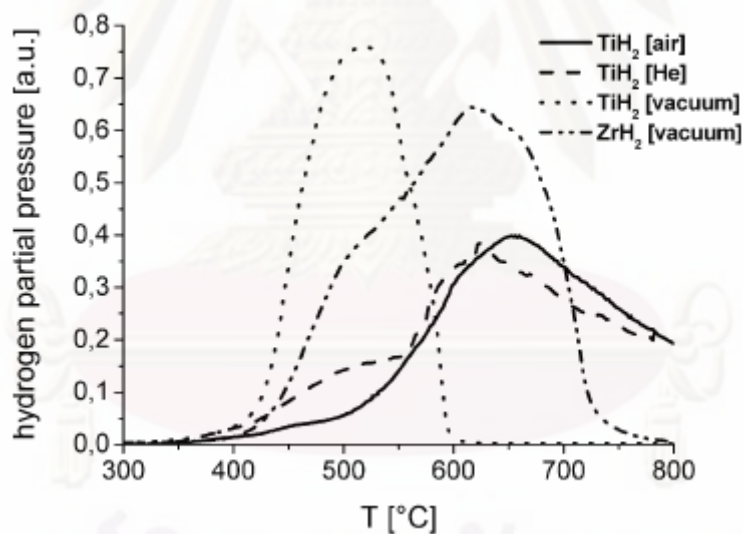
### 2.5.7 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น จะเกิดการขยายตัวของ Precursor เร็วกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากเกิดการหลอมเหลวของ Precursor ที่เร็วกว่า และที่อัตราการให้ความร้อนไม่

แตกต่างกันมากนักพบว่า อัตราการขยายตัวของ Precursor มีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำกว่ามากพบว่าอัตราการขยายตัวสูงสุดของ Precursor มีค่าต่ำกว่าที่อัตราการให้ความร้อนอื่นๆ ซึ่งเหตุผลที่อาจเป็นไปได้เนื่องมาจาก (1) แก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ได้แพร่ออกไปจาก Precursor ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 500 °C เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของ  $TiH_2$  อย่างรวดเร็ว , (2) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ขึ้นที่ผิวของผง Precursor และภายในของ Precursor ในบริเวณที่อากาศสามารถผ่านเข้าไปได้ ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีจุดหลอมเหลวสูงมากจึงทำให้อยู่ในสถานะของแข็งตลอดทั้งกระบวนการผลิตโพลีเมอร์ และมีส่วนในการยับยั้งการขยายตัวของ Precursor

### 2.5.8 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์

เพื่อให้การขยายตัวของโพลีเมอร์เกิดขึ้นมากที่สุด บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการขยายตัวของโพลีเมอร์ บรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์มีผลโดยตรงต่อการเกิดออกซิเดชัน พบว่าบรรยากาศที่มีออกซิเจน จะมีผลทำให้อุณหภูมิการปล่อยแก๊ส  $H_2$  สูงขึ้น

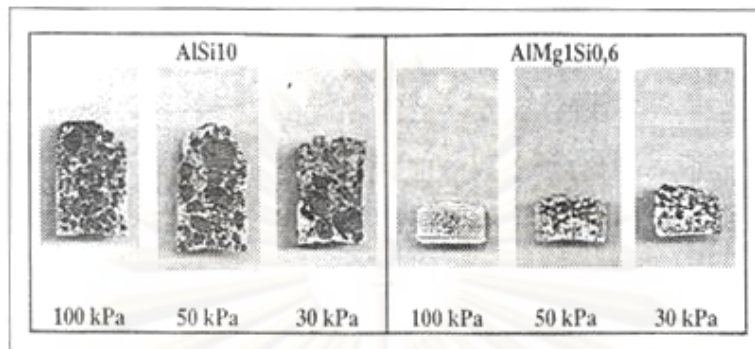


รูปที่ 2.10 แสดงการปล่อยแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ที่บรรยากาศต่างๆ [9]

จากรูปที่ 2.10 แสดงผลของบรรยากาศที่มีออกซิเจนจะมีผลทำให้อุณหภูมิการปล่อยแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) สูงขึ้น กว่าบรรยากาศที่เป็นฮีเลียมและไม่มีอากาศใดๆ

ความดันบรรยากาศที่ให้กับโพลีเมอร์ในขั้นตอนการผลิตมีผลต่อการขยายตัวของโพลีเมอร์ การลดลงของความดันบรรยากาศส่งผลให้ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าของโพลีเมอร์ที่กำลัง

ขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความสามารถในการขยายตัวของผิวหน้าโฟมมากขึ้น รูปที่ 2.11 แสดงผลของความดันบรรยากาศที่มีต่อการขยายตัวของโฟม



รูปที่ 2.11 ผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม [10]

### 2.5.9 การถ่ายเทความร้อนของชิ้นงาน

การถ่ายเทความร้อนของชิ้นงาน มีผลอย่างมากต่อการโฟม ถ้าหากการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อน หรือ ความหนาของแม่พิมพ์ในเตาเผา ไม่เท่ากัน ทำให้มีผลต่อการขยายตัวหรือเย็นตัวที่ไม่เท่ากันของชิ้นงานในการโฟม ถ้าการถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอ ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิในการโฟมของชิ้นงานได้ง่าย แต่ถ้าการถ่ายเทความร้อนไม่สม่ำเสมอ จะทำให้การควบคุมอุณหภูมิในการโฟมของชิ้นงานทำได้ยาก และมีผลทำให้โครงสร้างของโฟมเปลี่ยนไป

## 2.6 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

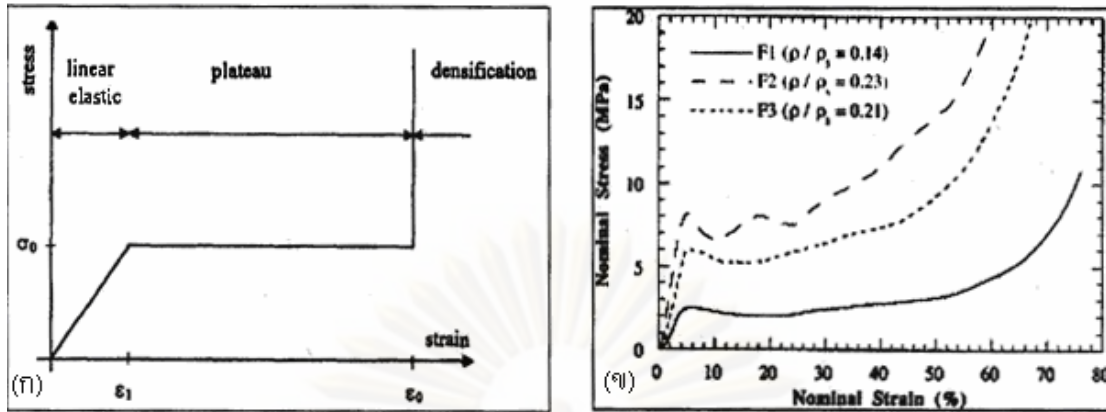
สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมนั้นจะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ชนิดของธาตุผสม และลักษณะของโพรงอากาศ และการนำไปใช้งานส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงาน โดยเมื่อความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้โฟมอะลูมิเนียมสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น

### 2.6.1 ลักษณะการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

ลักษณะการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเปลี่ยนรูปอีลาสติกแบบเส้นตรง (Linear elastic) บริเวณที่ราบ (Plateau regime) และ การอัดแน่น (Densification) ดังรูปที่

2.12 (ก)





รูปที่ 2.12 (ก) Stress-Strain curve ของโฟมโลหะในอุดมคติ (ข) Stress-Strain curve ของโฟมโลหะที่ได้จากการทดสอบจริง [11]

เมื่อโฟมรับแรงอัดจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก ซึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้น ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่น และความเค้นแรงอัดจะลดลงเมื่อมีปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น

บริเวณที่เส้นกราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าคงที่ (Plateau regime) ความเค้นมีค่าคงที่ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น สาเหตุเนื่องจากการเริ่มเกิดและขยายตัวของแถบการเปลี่ยนรูป (Deformation band) ภายในโฟม และจะเกิดการเปลี่ยนรูปจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการอัดแน่นของโฟม (Densification) ในช่วงสุดท้ายของการเปลี่ยนรูป ความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น โพรงอากาศที่เปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะส่งผลให้โพรงอากาศข้างเคียงรับแรงได้น้อยลง นำไปสู่การพังของโพรงอากาศข้างเคียงในที่สุด

สำหรับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโฟมภายใต้แรงอัด มีทั้งการเปลี่ยนรูปของโพรงอากาศแบบอิลาสติก และแบบพลาสติก สำหรับการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัดส่วนมอดุลัสของโฟมกับของแข็ง ( $E^*/E_s$ ) กับค่าสัดส่วนความหนาแน่นของโฟมกับของแข็ง ( $\rho^*/\rho_s$ ) ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C_1' \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.3)$$

- โดยที่  $E^*$  คือ ค่า Young's modulus ของโฟม
- $E_s$  คือ ค่า Young's modulus ของของแข็ง
- $\rho^*$  คือ ค่าความหนาแน่นของโฟม
- $\rho_s$  คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
- $C_1, C_1'$  คือ ค่าคงที่ มีค่าประมาณ 0.32

ส่วนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัดส่วนความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟมกับของแข็ง  $\left(\frac{\rho_{pl}^*}{\rho_{ys}}\right)$  กับค่าสัดส่วนความหนาแน่นของโฟมกับของแข็ง  $\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$  ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2} + C_3' \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (2.4)$$

โดยที่  $\sigma_{pl}^*$  คือ ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟม  
 $\sigma_{ys}$  คือ ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของของแข็ง  
 $C_3, C_3'$  คือ ค่าคงที่มีค่า  $C_3 = 0.33$  และ  $C_3' = 0.44$

สำหรับอะลูมิเนียมทั่วไปจะมีค่า  $E_s = 70$  GPa,  $\sigma_s = 300$  MPa และ  $\rho_s = 2.7$  g/cm<sup>3</sup>

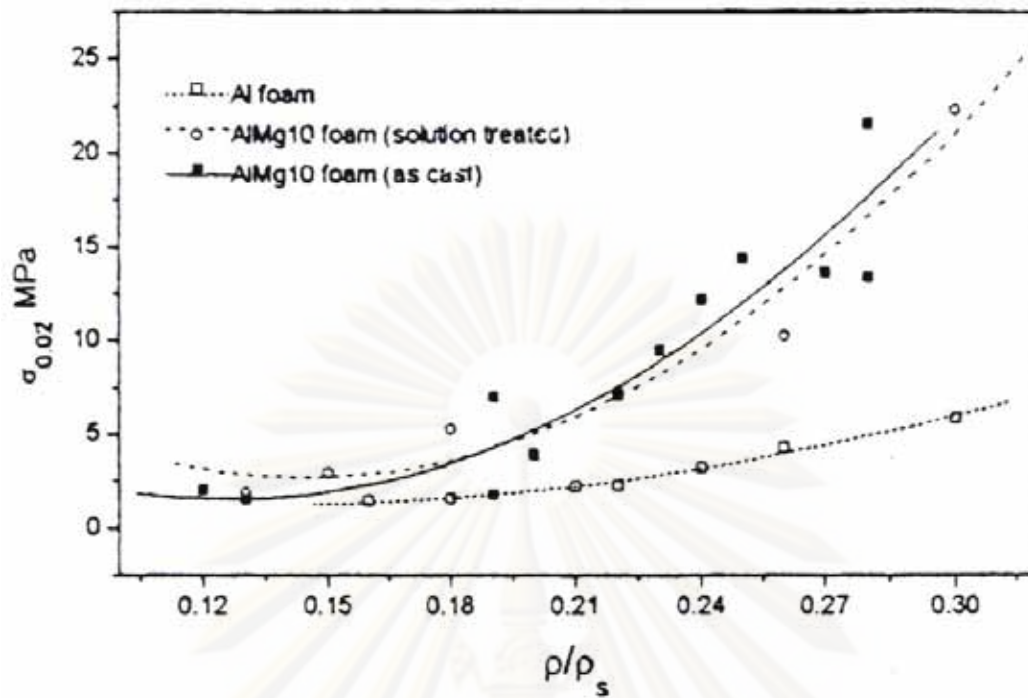
## 2.6.2 การดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม

การดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม คือความสามารถในการรับแรงอัดก่อนที่โฟมอะลูมิเนียมจะเกิดการเสียหาย เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมมีช่วงที่กราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าคงที่กว้าง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากกว่าก่อนที่จะเกิดการแตกหักเสียหายจึงเหมาะที่จะใช้เป็นอุปกรณ์ในการรับแรงกระแทก

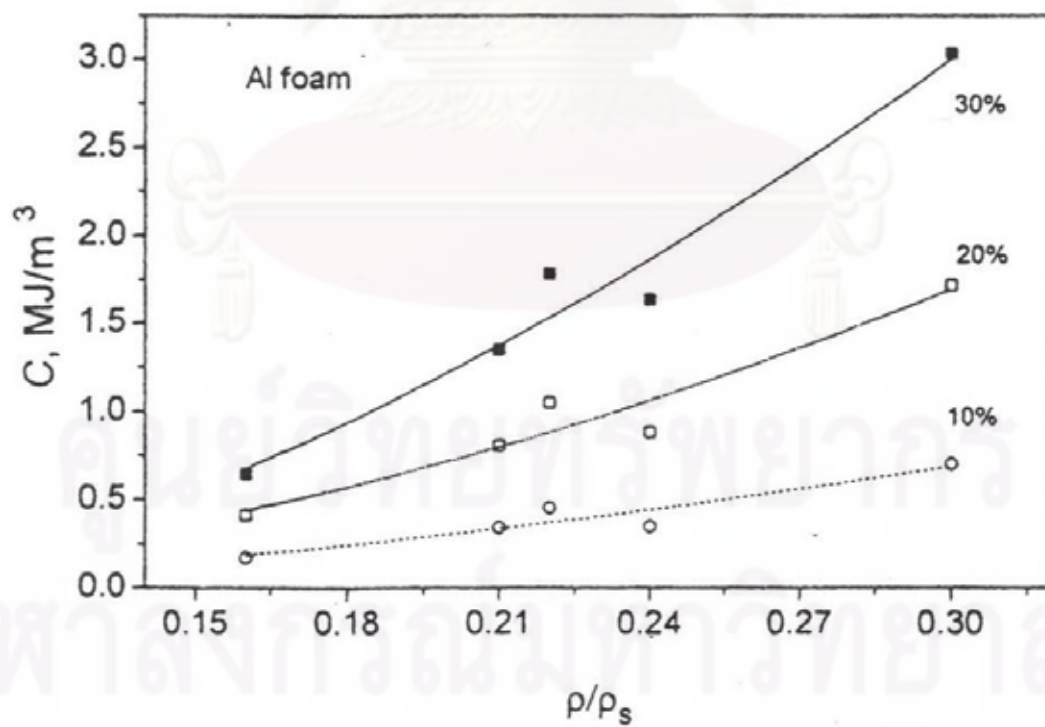
## 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

### 2.7.1 ความหนาแน่นของโฟม

ความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.13 และ รูปที่ 2.14 เนื่องจากมีวัสดุเนื้อพื้นที่เป็นโครงสร้างของโฟมมากกว่าทำให้มีการดูดซับและกระจายแรงได้มากกว่า



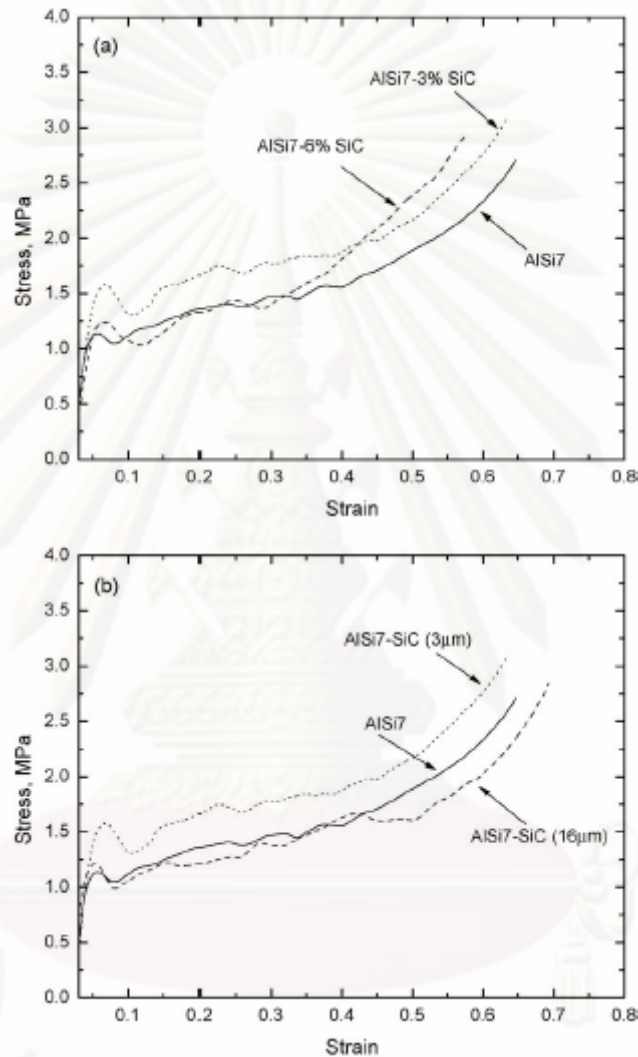
รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมต่างชนิดกัน [12]



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม [12]

### 2.7.2 การเติมอนุภาคเซรามิก

อนุภาคเซรามิกที่เติมเข้าไปในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีผลต่อแรงดึงผิวและความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมในขณะทำการผลิตโฟม โดยแรงดึงผิวของอะลูมิเนียมเหลวจะลดลงเมื่อเติมธาตุผสมทำให้การแตกของโพรงอากาศในขณะทำการผลิตโฟมยังเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นโฟมที่ได้จึงมีเสถียรภาพมากขึ้นส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงอัดและดูดซับพลังงานมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.15 ผลของ (a) ปริมาณ ของ SiC ที่ขนาด 3  $\mu\text{m}$  และ (b)ขนาดของ SiC ที่ 3 vol.% ที่มีต่อความแข็งแรงอัด ของโฟมอะลูมิเนียม AISi7 [8]

จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงขนาดและปริมาณของ SiC ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล โดยที่เมื่อเพิ่มปริมาณ vol.% SiC จะทำให้จุดคราก (Yield)เพิ่มให้สูงขึ้น โดยที่ปริมาณ 3 vol.% SiC สามารถรับความเค้นได้มากที่สุด แต่การรับความเครียดจะน้อยกว่าในกรณี ไม่ผสม SiC และที่ 3 vol.% SiC ขนาดของ SiC 3  $\mu\text{m}$  สามารถรับความเค้นได้มากที่สุด แต่การรับความเครียดจะน้อยกว่าในกรณีผสม SiC ขนาด 16  $\mu\text{m}$  และในกรณีไม่ผสม SiC

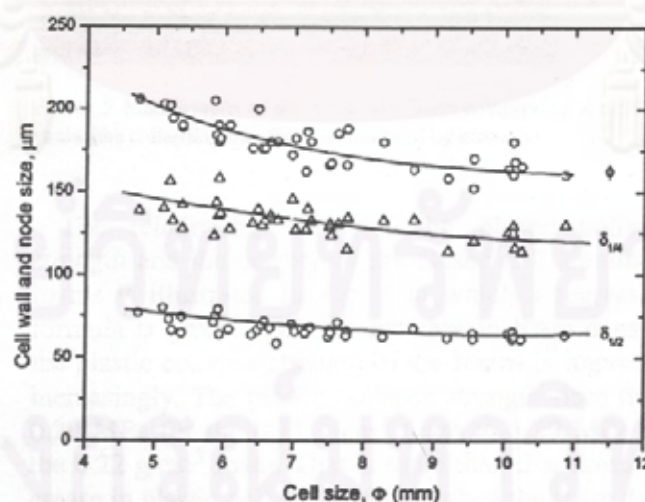
จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า ในช่วงที่กราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าคงที่กว้าง แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากกว่าก่อนที่จะเกิดการแตกหักเสียหาย โดยที่ความสามารถในการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น

### 2.7.3 ปริมาณของโพรงอากาศ

โครงสร้างโฟมมีการกระจายของความหนาแน่นที่ไม่ทั่วถึงเท่ากันทั้งโครงสร้างจึงมีผลต่อสมบัติทางกลของโฟม รวมทั้งการดูดซับพลังงานด้วย โดยหากอัตราส่วนของโพรงอากาศมาก หมายความว่าความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้นลดลง ด้วยเหตุนี้ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานจึงลดลงด้วย อีกทั้งยังสามารถบ่งบอกถึงการกระจายตัวของโพรงอากาศได้อีกด้วย ซึ่งค่าอัตราส่วนของโพรงอากาศที่มาก หมายถึงการกระจายตัวที่ดีของโพรงอากาศ โดยยังไม่พิจารณาขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศ

### 2.7.4 ขนาดของโพรงอากาศ

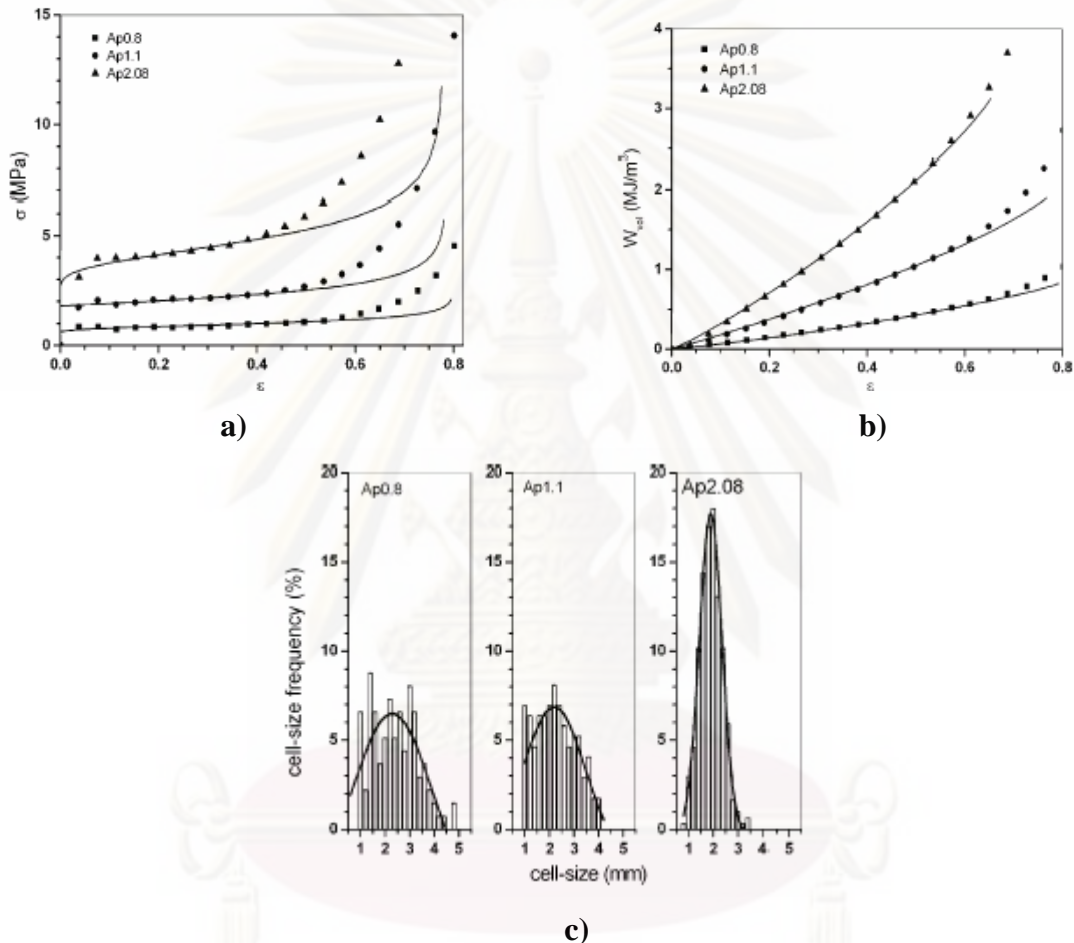
ขนาดของโพรงอากาศส่งผลต่อความแข็งแรงอัด โดยที่ขนาดของโพรงอากาศที่เล็กจะมีความหนาของผนังโพรงอากาศที่หนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้โครงสร้างที่มีขนาดโพรงอากาศที่เล็ก มีความแข็งแรงมากกว่า โครงสร้างที่มีขนาดโพรงอากาศที่ใหญ่ และเนื่องจากการที่ขนาดโพรงอากาศที่ใหญ่ มีผนังโพรงอากาศที่บาง เป็นผลให้เกิดรอยพับและรอยแตก (Cracks) ได้ง่ายกว่า เนื่องจากความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) ดังนั้นการควบคุมขนาดของโพรงอากาศให้มีขนาดที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 10 mm จะเป็นการควบคุมความหนาของผนังโพรงอากาศไปด้วย [13]



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับความหนาผนังโพรงอากาศ [13]

### 2.7.5 การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ

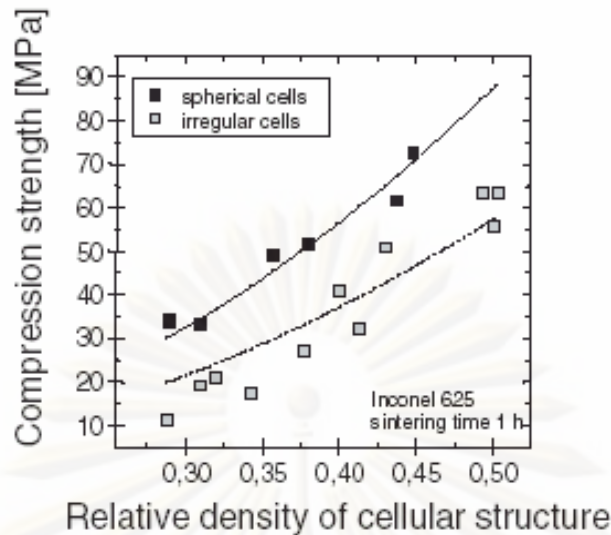
การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศที่น้อยหรือมีขนาดที่สม่ำเสมอทั่วทั้งโฟมจะมีค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานที่มากกว่าโฟมที่มีการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศมาก ดังรูปที่ 2.17 เพราะโพรงอากาศที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอขณะที่รับความเค้นจะเกิดความไม่สมดุลของแต่ละบริเวณจึงรับความเค้นและดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า



รูปที่ 2.17 แสดง a) ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงอัดกับการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ b) ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับพลังงานกับการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ c) การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ [14]

### 2.7.6 รูปร่างของโพรงอากาศ (Cell shape)

ในทางทฤษฎีโพรงอากาศจะมีรูปร่างในอุดมคติเป็นแบบ Polyhedral แต่ในความเป็นจริงโพรงอากาศของโฟมโลหะมีรูปร่างที่แตกต่างกันแม้จะอยู่ในชิ้นงานเดียวกันก็ตาม



รูปที่ 2.18 แสดงผลของรูปร่างโพรงอากาศต่อความแข็งแรงอัด [15]

รูปที่ 2.18 แสดงถึง โพรงอากาศที่มีลักษณะกลมจะมีความแข็งแรงอัดมากกว่าโพรงอากาศที่มีลักษณะไม่แน่นอน เนื่องจากโพรงอากาศที่มีลักษณะไม่แน่นอนจะมีความเข้มข้นของความเค้นสูงบริเวณขอบเหลี่ยมมุมทำให้เกิดการแตกหักหรือเสียหายได้ง่ายกว่าเมื่อรับแรงเท่ากับ โพรงอากาศที่มีลักษณะกลม

### 2.7.7 ทิศทางของโพรงอากาศ

ทิศทางของโพรงอากาศ มีผลต่อคุณสมบัติทางกล โดยที่เมื่อได้รับความเค้นในทิศทางขนานกับทิศทางในการผลิตโฟม พบว่ามีความแข็งแรงอัดสูงกว่ารับแรงในทิศทางตั้งฉากกับการผลิตโฟม เนื่องจากพื้นที่ในการสัมผัสแรงในทิศทางขนานกับการผลิตโฟมมีน้อยกว่าในทิศตั้งฉากทำให้ความเค้นมีค่าสูงกว่าที่แรงเท่ากัน นอกจากนี้ระยะในการเสีรูปร่างของโพรงอากาศในทิศทางขนานกับชิ้นงานยังมีมากกว่าด้วยจึงทำให้มีการดูดซับพลังงานที่มากกว่า

### 2.7.9 จุดบกพร่อง

จุดบกพร่องอาจเกิดระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การบิดของผนังโพรงอากาศ ความหนาของผนังโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ และอื่นๆ ซึ่งจุดบกพร่องเหล่านี้จะทำให้ความแข็งแรงของโฟมลดลง โดยจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเสีรูปร่างเนื่องจากเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุด

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 ผงอะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.9 %
- 3.1.2 ผงไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH<sub>2</sub>) ความบริสุทธิ์ 99.6 %

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.2 ครอบคลุมสาร
- 3.2.3 เครื่องผสมผงโลหะ แบบเขย่า 2 แกน
- 3.2.4 แบบสำหรับขึ้นรูป Precursor ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm
- 3.2.5 แม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm
- 3.2.6 เตาสำหรับอบชิ้นงาน
- 3.2.7 เครื่องอัดไฮดรอลิกขึ้นรูป Precursor
- 3.2.8 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine
- 3.2.9 กล้องจุลทรรศน์แสง
- 3.2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) รุ่น JSM-6400
- 3.2.11 เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision Cutting Machine) ยี่ห้อ Buehler รุ่น ISOMET 2000
- 3.2.12 เครื่องขัดชิ้นงาน
- 3.2.13 เรซินชนิดใส
- 3.2.14 กระดาษทราย และ ผงเพชร สำหรับขัดชิ้นงาน
- 3.2.15 โปรแกรม Image J ใช้ในการวิเคราะห์ภาพ

#### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.3.1 การอบให้ความร้อนวัสดุผง

- 3.3.1.1 อบให้ความร้อน ผงอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C เป็นเวลา 180 นาที ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ไหลผ่านในเตาอบด้วยอัตรา 500 cm<sup>3</sup>/min และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



**3.3.1.2** อบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ที่อุณหภูมิ  $400^\circ C$  ,  $450^\circ C$  , และ  $500^\circ C$  เป็นเวลา 60 นาที ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ไหลผ่านในเตาอบด้วยอัตรา  $500 \text{ cm}^3/\text{min}$  และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

### 3.3.2 การผลิต Precursor

ผสมผงอะลูมิเนียม ที่ผ่านการอบให้ความร้อนกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนในปริมาณ 0.6wt.% โดยมีน้ำหนักรวม 10 กรัม แล้วผสมผงวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องผสมผงโลหะเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำผงที่ผสมเรียบร้อยแล้ว ไปอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (Die) ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ ซึ่งใช้สารหล่อลื่น (Magnesium stearate) ทาบริเวณพื้นผิวภายในแม่พิมพ์เพื่อให้สามารถนำ Punch ออกจากตัวแม่พิมพ์ได้ง่ายและลดความเสียหายเนื่องจากการเสียดสีกันระหว่าง Punch กับตัวแม่พิมพ์ด้วย โดยใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูป 650 MPa เพื่อให้ได้ Precursor ที่มีความหนาแน่นทางทฤษฎีสูงกว่า 99 % ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่ทำให้เกิดโครงสร้างโฟมที่ดี

### 3.3.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

นำ Precursor ที่ได้ใส่ลงในแม่พิมพ์ที่มีหน้าตัดวงกลมที่ใช้โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride) ทาบริเวณพื้นผิวภายในแม่พิมพ์แล้วนำไปให้ความร้อนในเตาที่มีการ ตั้งอุณหภูมิที่  $800^\circ C$  โดยทำการประมาณเวลาที่ Precursor จะขยายตัวสูงสุด จากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากเตาแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ แล้วนำไปตรวจวัดความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้

### 3.3.4 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม

การวัดความหนาแน่นของ Precursor ทำได้โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดขนาดของ Precursor เพื่อคำนวณหาปริมาตรของ Precursor จากนั้นนำ Precursor ไปชั่งเพื่อหาน้ำหนัก นำน้ำหนักและปริมาตรของ Precursor มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นตามสมการ (3.1)

$$D_{precursor} = \frac{m_{precursor}}{V_{precursor}} \quad (3.1)$$

โดยที่  $m_{precursor}$  = น้ำหนักของ Precursor (g)

$V_{precursor}$  = ปริมาตรของ Precursor ( $\text{cm}^3$ )

การวัดความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียม ทำโดยการใช่วิธี Archimedes' densitometry ดังสมการ (3.2)

$$D_{foam} = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \quad (3.2)$$

โดยที่  $W_{air}$  = น้ำหนักของโฟมในอากาศ (g)

$W_{water}$  = น้ำหนักของโฟมในน้ำ (g)

การหาการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมสามารถหาได้จากสมการ (3.3)

$$\% Expansion = \left[ \frac{V_{foam} - V_{precursor}}{V_{precursor}} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่  $V_{precursor}$  = ปริมาตรของ Precursor (cm<sup>3</sup>)

$V_{foam}$  = ปริมาตรของโฟม (cm<sup>3</sup>)

### 3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างของ โฟมอะลูมิเนียม

#### 3.3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม

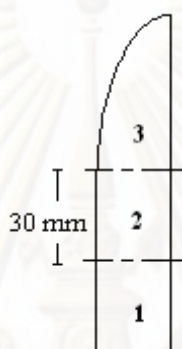
สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคภายในของโฟมอะลูมิเนียม สามารถทำได้ โดยการตัดโฟมอะลูมิเนียมในแนวตั้งฉากกับฐานของโฟมด้วยเครื่อง Precision Cutting Machine (ยี่ห้อ Buehler รุ่น ISOMET 2000) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากนั้นนำชิ้นส่วนโฟมอะลูมิเนียมที่ตัดแล้วไปพ่นสเปรย์สีดำ เมื่อรอให้สีแห้งแล้ว นำไปขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อให้เกิดความคมชัดของโครงสร้าง สแกนโครงสร้างโฟมด้วยเครื่องสแกนรูปที่มีความละเอียด 1200 dpi



รูปที่ 3.1 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโฟมอะลูมิเนียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

### 3.3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ โฟมอะลูมิเนียม

นำโฟมอะลูมิเนียม ไปตัดด้วยเครื่อง Precision Cutting Machine ตามทิศทางในรูปที่ 3.2 จากนั้นนำ อะลูมิเนียมในส่วนที่ 1 และ 3 (ในรูปที่ 3.2) ไปทำ cold mounting โดยใช้เรซินใส เพื่อเตรียมสำหรับขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้าง นำ Precursor และโฟมอะลูมิเนียมที่ทำการ Mount แล้วไปขัดหยาบด้วยกระดาษทราย และขัดละเอียดด้วยผงเพชร แล้วจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดแล้วไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และ SEM



รูปที่ 3.2 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโฟมอะลูมิเนียมเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค

## 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

### 3.4.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน DSC , TGA

การวิเคราะห์ทางความร้อน Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ใช้ในการวิเคราะห์ผง  $TiH_2$  ที่ผ่านและไม่ผ่านการอบให้ความร้อน โดยวัดการเปลี่ยนแปลงมวลสารเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และ Differential Scanning Calorimeter (DSC) ใช้ในการวิเคราะห์ผง  $TiH_2$  ที่ผ่านและไม่ผ่านการอบให้ความร้อน โดยวัดการเกิดปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อนเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนบรรจุในผง Al

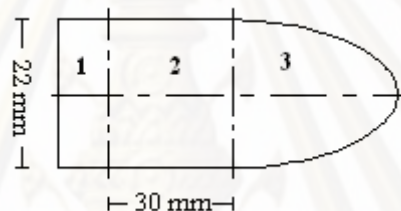
การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนบรรจุในผง Al ด้วยเครื่อง Oxygen/Nitrogen Analyzer โดยนำผง Al จำนวน 0.5 g ใส่ใน Graphite crucible แล้วเผาใน Extraction furnace ในบรรยากาศแก๊ส He. ธาตุ O และ N ของชิ้นงานออกมาในรูปแบบของแก๊ส CO และ  $N_2$  ไปสู่ Detector เพื่อประมวลผล

### 3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างโฟมด้วยวิธี Image analysis

วิเคราะห์รูปด้วยโปรแกรม Image J เป็นการวิเคราะห์ที่สามารถบอกค่าสมบัติต่างๆของโครงสร้างโฟมออกมาเป็นค่าเชิงปริมาณได้ เช่น ขนาดของโพรงอากาศ ค่าสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโฟมอะลูมิเนียม เป็นต้น

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติทางกลด้วยวิธี การทดสอบการรับแรงอัด

นำโฟมอะลูมิเนียมที่ได้จากการทดลองไปตัดด้วยเครื่อง Precision Cutting Machine ในทิศทางดังรูปที่ 3.3 นำโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านการตัดแล้วในส่วนที่ 2 ไปทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดโดยใช้ความเร็วของหัวกดเท่ากับ 5 mm/min และอัดโฟมอะลูมิเนียมจนถึง 60%ของระยะความเครียด



รูปที่ 3.3 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโฟมอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง Precision Cutting Machine

เมื่อได้ผลการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม คือ

- 3.4.4.1 ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นที่จุดตัดระหว่างกราฟจากผลการทดสอบแรงอัดกับเส้นตรงขนานเส้นกราฟช่วงแรก โดยตัดแกนที่ 0.2% ความเครียด มีหน่วยเป็น MPa
- 3.4.4.2 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption,  $E_{60}$ ) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด มีหน่วยเป็น  $\text{MJ}/\text{cm}^3$
- 3.4.4.3 ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption efficiency,  $\eta$ ) เป็นค่าที่หาได้จากสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเทียบกับพื้นที่สี่เหลี่ยมของกราฟ ณ จุดสิ้นสุดของเส้นกราฟ

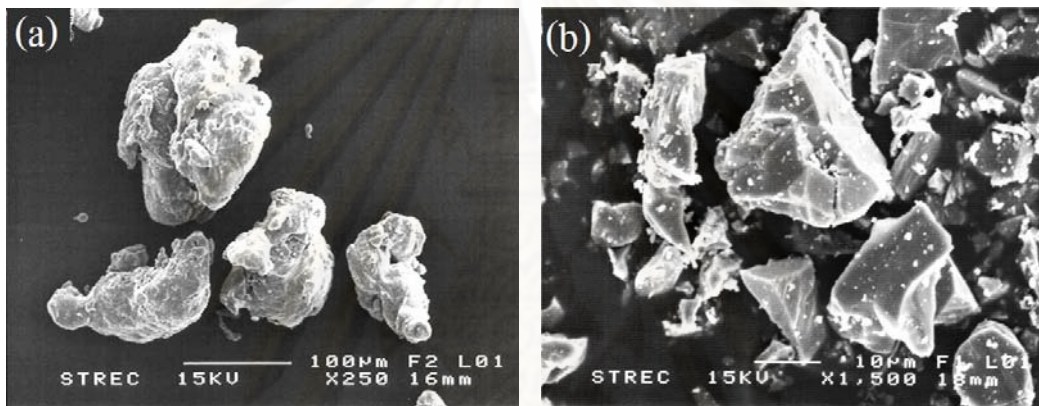
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 คุณลักษณะของวัสดุ

##### 4.1.1 รูปร่างและลักษณะของวัสดุดิบ

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปร่างของผง Al และผง TiH<sub>2</sub> โดยที่ผง Al มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นผิวมีลักษณะโค้งมนเป็นชั้นๆ มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเล็กน้อย ส่วนผง TiH<sub>2</sub> มีรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมและมุม พื้นผิวคล้ายหินที่แตกหัก ไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน



(a) Al

(b) TiH<sub>2</sub>

รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของวัสดุ (a) ผง Al และ (b) ผง TiH<sub>2</sub>

##### 4.1.2 ขนาดและความหนาแน่นของวัสดุดิบ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าขนาดของผง Al และ TiH<sub>2</sub> โดยผง Al ซึ่งใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้นมีขนาดเฉลี่ย 108.44 µm ในขณะที่ ผง TiH<sub>2</sub> ซึ่งเป็นสารปฏิกิริยาแก๊สมีขนาดเฉลี่ยน้อยกว่า 46 µm

Materials	Purity (%)	D <sub>10</sub> (µm)	D <sub>50</sub> (µm)	D <sub>90</sub> (µm)	Mean diameter (µm)
Al	99.9	45.62	101.55	184.10	108.44
TiH <sub>2</sub>	99.6	< 46 µm			

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของผง Al และ TiH<sub>2</sub>

#### 4.1.3 ผลของผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อน

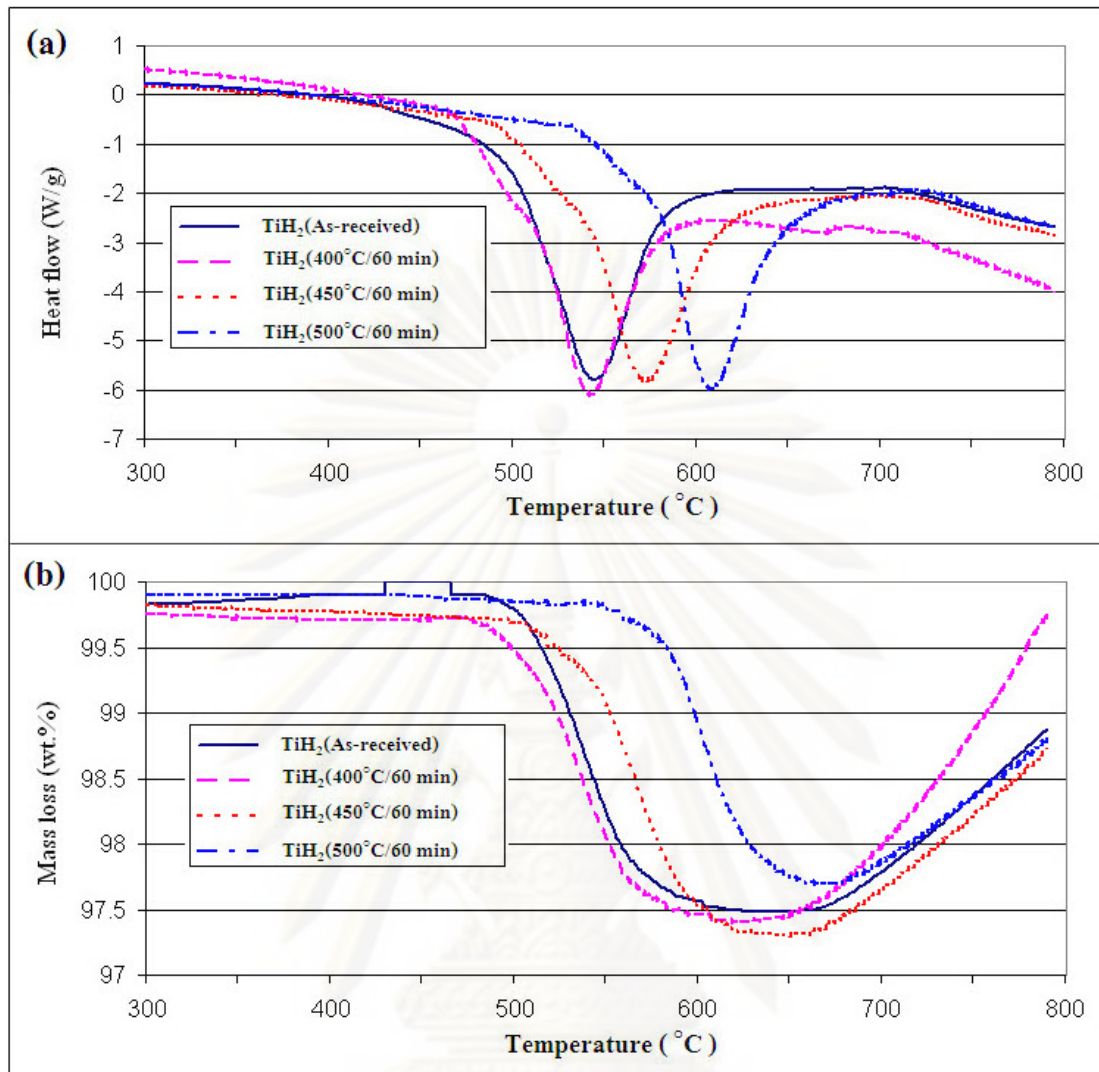
โดยทั่วไปกระบวนการผลิตผง Al ด้วยวิธี Atomization ทำให้เกิดผง Al ที่มีออกไซด์ปกคลุมผิว โดยที่ปริมาณออกไซด์แตกต่างกันขึ้นอยู่กับบรรยากาศที่ใช้ในกระบวนการผลิตผง ถ้าบรรยากาศที่ใช้มีปริมาณออกซิเจนมาก ก็จะทำให้เกิดผง Al ที่มีออกไซด์มากตามไปด้วย จากการตรวจสอบผงที่ใช้ในการทดลองด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนค่าที่ได้ตามตารางที่ 4.2 พบว่าผง Al บริสุทธิ์มีปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 0.35 wt.% ในขณะที่ ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 0.45 และ 0.50 wt.% ตามลำดับ

Al powder	Oxygen Content (wt.%)
As-received	0.35
450°C/60 min	0.45
500°C/60 min	0.50

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณออกซิเจนบรรจุที่ผง Al

#### 4.1.4 ผลของผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อน

รูปที่ 4.2 (a) แสดงกราฟ DSC ของผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน โดยกราฟทั้งหมดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงแรกของกราฟ ความร้อนจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งความร้อนที่ลดลงนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาการดูดความร้อน เมื่อถึงอุณหภูมิที่ผง TiH<sub>2</sub> เกิดการสลายตัวและปล่อยแก๊ส H<sub>2</sub> ออกมาปริมาณมาก เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงจุดต่ำสุด โดยที่ผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ เริ่มเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อนอย่างรวดเร็ว ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อน โดยที่ผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ช่วงอุณหภูมิเกิดการสลายตัวของผง TiH<sub>2</sub> หรือเริ่มเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อนอย่างรวดเร็วมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ จากกราฟพบว่าผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ เริ่มเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อนอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 475°C และปฏิกิริยาการดูดความร้อนต่ำสุดที่อุณหภูมิ 543°C ในขณะที่ผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ช่วงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ โดยที่ผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C, 450°C, และ 500°C เริ่มเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อนอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 492°C, 505°C, 560°C และปฏิกิริยาการดูดความร้อนต่ำสุดที่อุณหภูมิ 542°C, 571°C, และ 567°C ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟการทดสอบทางความร้อนของ  $\text{TiH}_2$  (a) DSC และ (b) TG

รูปที่ 4.2 (b) แสดงกราฟ TG ของผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน โดยกราฟในช่วงแรกผง  $\text{TiH}_2$  มีน้ำหนักค่อยๆเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ ผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน มีน้ำหนักค่อยๆลดลงเล็กน้อย ในช่วงที่อุณหภูมิผง  $\text{TiH}_2$  เกิดการสลายตัว ผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน มีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดต่ำสุด แล้วจึงมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ โดยที่ผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์ อุณหภูมิเริ่มมีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วอยู่ต่ำกว่าผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน และมีน้ำหนักลดลงมากกว่าผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน โดยที่การอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิเริ่มมีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วเพิ่มสูงขึ้นและน้ำหนักที่สูญเสียมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิการอบให้ความร้อนสูงขึ้นตามลำดับ จากกราฟพบว่าผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์ อุณหภูมิเริ่มมีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วอยู่ที่ 473  $^{\circ}\text{C}$  และมีน้ำหนักลดลงอยู่ที่ 2.48 wt.% ในขณะที่ผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}\text{C}$ , 450 $^{\circ}\text{C}$ , และ 500 $^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิเริ่มมีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วเพิ่มสูงขึ้นเทียบกับผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์อยู่ที่

490°C, 503°C, และ 558°C แต่น้ำหนักที่สูญเสียมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์โดย น้ำหนักลดลงอยู่ที่ 2.32, 2.39, และ 2.13 wt.% ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 (a) และ 4.2 (b) พบว่าลักษณะกราฟทั้ง 2 มีความสอดคล้องกัน โดยที่เมื่อถึง อุณหภูมิที่ผง TiH<sub>2</sub> เกิดการสลายตัวกราฟ DSC เริ่มเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อนอย่างรวดเร็วที่ อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มมีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วของกราฟ TG

ตารางที่ 4.3 สรุปผลที่ได้จากการทดสอบทางความร้อนผง TiH<sub>2</sub> เห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิเริ่ม เกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อนอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิเริ่มมีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น

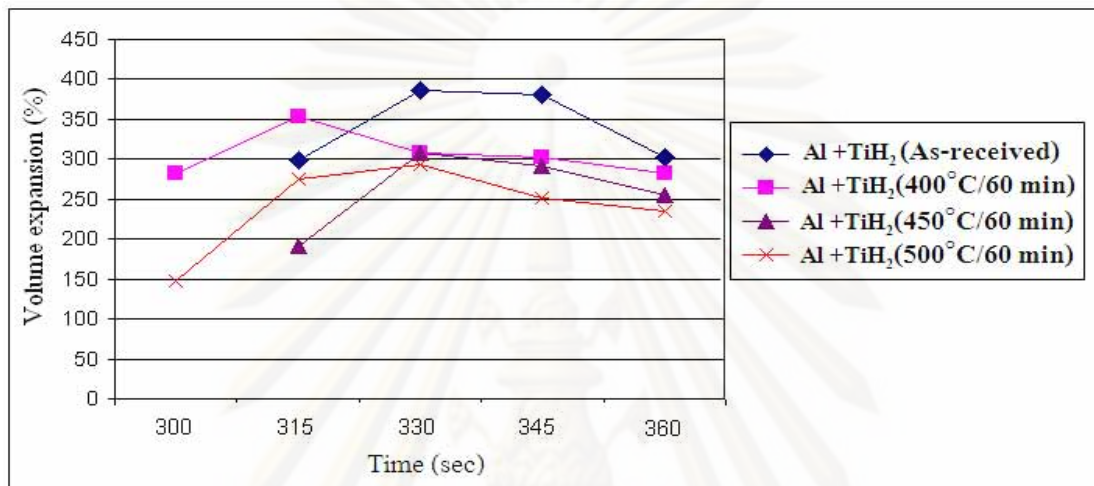
TiH <sub>2</sub> powder	DSC		TG	
	Onset (°C)	Minimum (°C)	Onset (°C)	Mass loss (wt. %)
As-received	475	543	473	2.48
400°C/60 min	492	542	490	2.32
450°C/60 min	505	571	503	2.39
500°C/60 min	560	607	558	2.13

ตารางที่ 4.3 แสดงผล DSC และ TG ของผง TiH<sub>2</sub>



#### 4.2 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์และผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ลักษณะกราฟเป็นการวัดค่าการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม โดยเป็นการวัดค่าทุกๆ 15 วินาทีในช่วงเวลา 300-360 วินาที เพื่อหาช่วงเวลาที่โฟมที่มีการขยายตัวสูงสุด



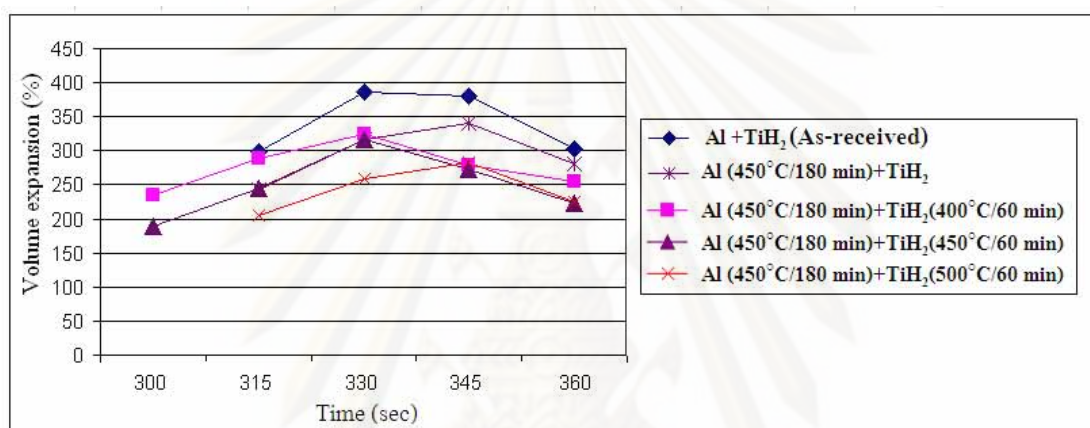
รูปที่ 4.3 กราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ และผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน

โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ เริ่มวัดการขยายตัวที่เวลา 315 วินาทีที่มีการขยายตัวที่ 300 vol.% และมีการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลามากขึ้นจนมีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาที การขยายตัวอยู่ที่ 385 vol.% และมีการขยายตัวลดลงเมื่อเวลามากขึ้น โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C เริ่มวัดการขยายตัวที่เวลา 300 วินาทีที่มีการขยายตัวอยู่ที่ 280 vol.% เมื่อเวลามากขึ้นมีการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นและมีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 315 วินาทีที่ 355 vol.% และเมื่อเวลามากขึ้น โฟมมีการขยายตัวลดลง โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เริ่มวัดที่เวลา 315 วินาทีการขยายตัวอยู่ที่ 190 vol.% มีการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาทีอยู่ที่ 315 vol.% และมีแนวโน้มการขยายตัวลดลงเมื่อเวลามากขึ้น โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เริ่มวัดที่เวลา 315 วินาทีที่มีการขยายตัวที่ 140 vol.% แล้วมีการขยายตัวเพิ่มสูงสุดที่เวลา 330 วินาทีที่ 290 vol.% และมีการขยายตัวลดลงเมื่อเวลามากขึ้น

จากกราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม พบว่า การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ ผง  $TiH_2$  มีผลต่อการขยายตัวสูงสุดของโฟม โดยที่ลำดับการขยายตัวสูงสุด ได้แก่

โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์ การขยายตัวสูงสุดที่ 385 vol.% ตามด้วย โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C, 450°C และ 500°C ซึ่งมีการขยายตัวสูงสุดที่ 355 vol.%, 315 vol.%, และ 290 vol.% ตามลำดับ

รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับ ผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน เปรียบเทียบกับโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์ ซึ่งลักษณะกราฟจะคล้ายคลึงกับ รูปที่ 4.3 โดยเป็นการวัดการขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมทุกๆ 15 วินาที โดยอยู่ในช่วงเวลา 300-360 วินาทีเพื่อหาเวลาโพมที่มีการขยายตัวสูงสุด



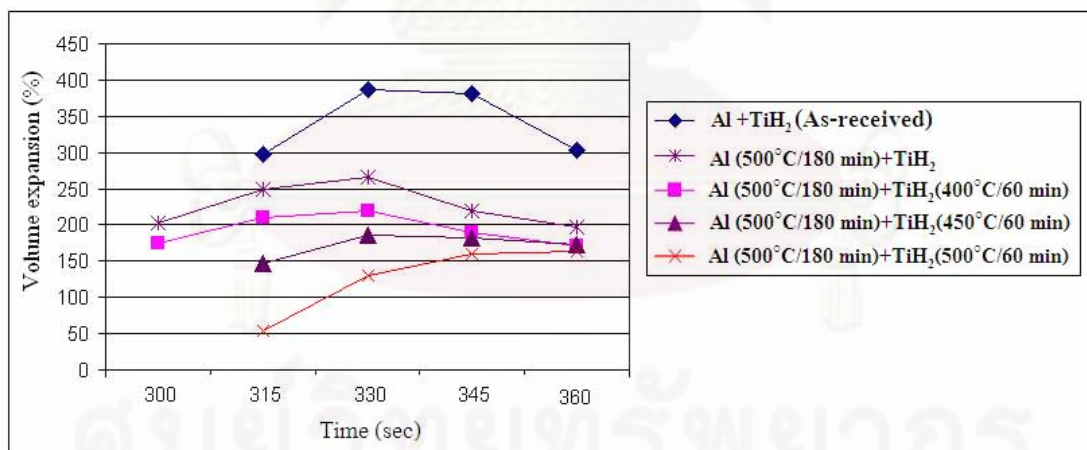
รูปที่ 4.4 กราฟการขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับ ผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน เปรียบเทียบกับ โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับ ผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์

โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์ เริ่มวัดการขยายตัวที่เวลา 315 วินาทีที่มีการขยายตัวอยู่ที่ 250 vol.% มีการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลา มากขึ้น และมีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 345 วินาทีที่ 340 vol.% และเมื่อเวลามากขึ้นมีแนวโน้มการ ขยายตัวลดลง ในส่วนของกรณีอื่นพบว่ามีลักษณะกราฟคล้ายคลึงกัน โดยโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C การขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาทีที่ 330 vol.%, โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C มีการ ขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาทีที่ 310 vol.%, โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 450°C กับผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C การขยายตัวสูงสุดที่ เวลา 345 วินาทีที่ 275 vol.%,

จากกราฟการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียม พบว่า การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ผง TiH<sub>2</sub> มีผลต่อการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมโดยที่ลำดับการขยายตัวสูงสุด ได้แก่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub>บริสุทธิ์ การขยายตัวสูงสุดที่ 340 vol.% ตามด้วย โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C, 450°C และ 500°C การขยายตัวสูงสุดที่ 330 vol.%, 310 vol.%, และ 275 vol.% ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C พบว่า การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C มีการขยายตัวสูงสุดต่ำกว่า โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ ในการใช้ผง TiH<sub>2</sub> ที่เหมือนกัน

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ และที่ผ่านการอบให้ความร้อน เปรียบเทียบกับโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับ ผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ ซึ่งลักษณะกราฟคล้ายคลึงกับ รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 โดยเป็นการวัดการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมทุกๆ 15 วินาที โดยอยู่ในช่วงเวลา 300-360 วินาที เพื่อหาเวลาโพลีที่มีการขยายตัวสูงสุด โดยลักษณะกราฟจะเริ่มมีการขยายตัวสูงขึ้นจนถึงการขยายตัวสูงสุดแล้วการขยายตัวจะเริ่มลดลง



รูปที่ 4.5 กราฟการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับ ผง TiH<sub>2</sub>บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน เปรียบเทียบกับ โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับ ผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์

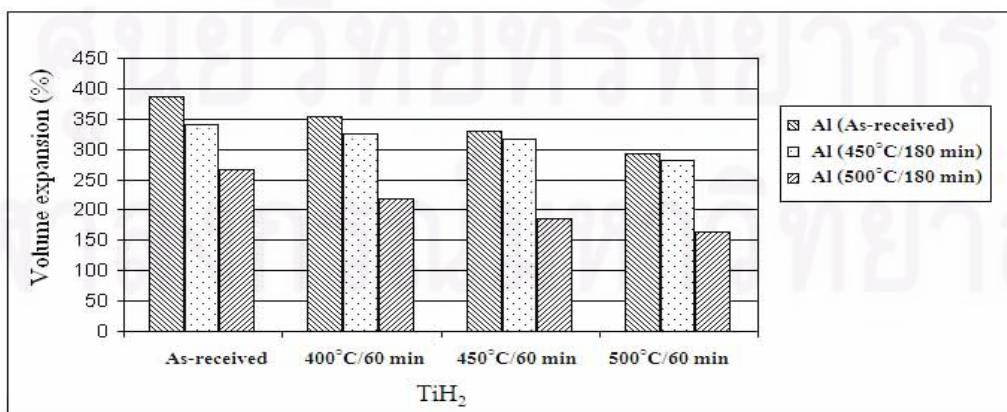
โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ มีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาทีที่ 268 vol.%, โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C มีการ

ขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาทีที่ 220 vol.%, โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C มีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาทีที่ 185 vol.%, โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C มีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 345 วินาทีที่ 160 vol.%,

จากกราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม พบว่า การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C ผง TiH<sub>2</sub> มีผลต่อการขยายตัวสูงสุดของโฟม โดยที่ลำดับการขยายตัวสูงสุด ได้แก่ โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ มีการขยายตัวสูงที่สุดที่ 268 vol.% ตามด้วย โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C, 450°C และ 500°C มีการขยายตัวสูงที่สุดอยู่ที่ 220 vol.%, 185 vol.%, และ 160 vol.% ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C พบว่า การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C มีการขยายตัวสูงสุดต่ำกว่า โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ ในการใช้ผง TiH<sub>2</sub> ที่เหมือนกัน

รูปที่ 4.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม พบว่าแนวโน้มการขยายตัวสูงสุด ของโฟมอะลูมิเนียม แปรผันกับการอบให้ความร้อนกับผง Al และผง TiH<sub>2</sub> โดยที่ โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ มีการขยายตัวสูงสุดมากกว่า โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C ตามลำดับ ในการใช้ผง TiH<sub>2</sub> ที่เหมือนกัน และโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ชนิดต่างๆ TiH<sub>2</sub> ยังมีผลทำให้การขยายตัวสูงสุดแตกต่างกันโดย TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ มีการขยายตัวสูงสุดมากกว่า TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C, 450°C และ 500°C ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

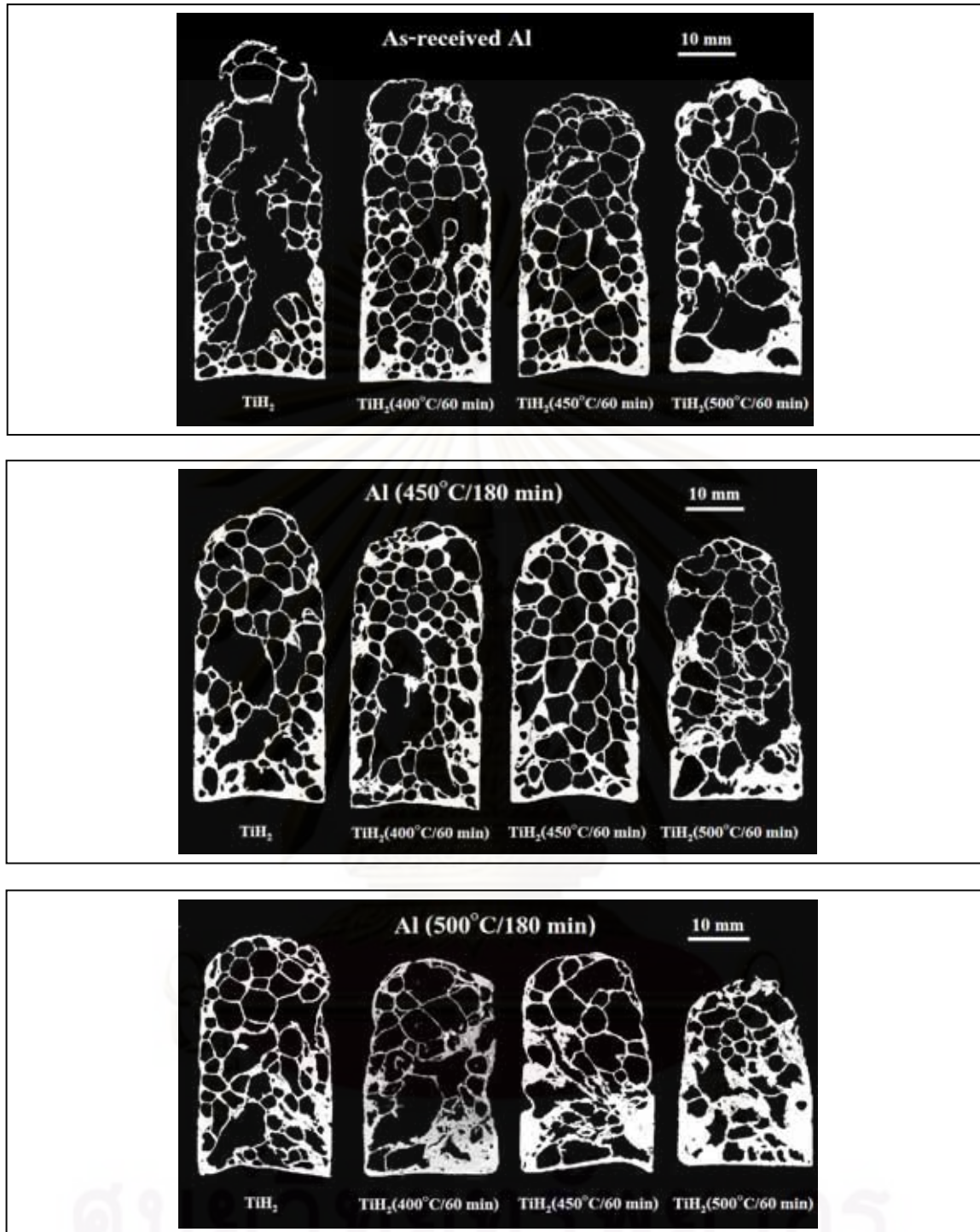
โดยที่ตาราง 4.4 เป็นผลสรุปการขยายตัวสูงสุดและสัดส่วนการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ เทียบกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับ ผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์

Conditions	Maximum expansion (%)	Relative expansion to Al + TiH <sub>2</sub> (%)
Al + TiH <sub>2</sub>	386.51	100
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub>	341.16	88
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub>	265.91	69
Al + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	352.79	91
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	325.50	84
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	218.89	57
Al + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	329.95	85
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	316.38	82
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	185.64	48
Al + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	292.64	76
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	281.80	73
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	163.69	42

ตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ เทียบกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับ ผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์

#### 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค

รูปที่ 4.7 แสดงภาพโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด และตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J โดยได้จากภาพโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง TiH<sub>2</sub> ชนิดต่างๆ มีแนวโน้มการขยายตัวสูงสุดมากที่สุด แต่การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการฉีกขาดและรวมตัวกันของโพรงอากาศมาก ในขณะที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ชนิดต่างๆมีแนวโน้มการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอมากที่สุด มีการฉีกขาดและรวมตัวกันของโพรงอากาศไม่มากนัก โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> ชนิดต่างๆ มีแนวโน้มการขยายตัวสูงสุดต่ำที่สุดมีการฉีกขาดและรวมตัวกันของโพรงอากาศ การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.7 ภาพโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Condition	Number of pores	Average equivalent pore diameter (mm)	Mean pore circularity	Area fraction of porosity (%)
Al + TiH <sub>2</sub>	86	2.27	0.62	81
Al + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	117	2.20	0.62	73
Al + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	94	2.46	0.56	75
Al + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	57	2.74	0.50	71
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub>	75	2.77	0.55	74
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	110	2.20	0.65	71
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	83	2.57	0.64	69
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	86	2.26	0.50	70
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub>	87	2.26	0.61	69
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	54	2.37	0.55	62
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	56	2.39	0.48	63
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	44	2.36	0.47	49

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J จากโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด

โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ พบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ มีการขยายตัวสูงสุด มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันขนาดใหญ่ การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอมีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐาน โฟมไม่มากนัก รูปทรงชิ้นงานบริเวณส่วนปลายมีลักษณะหดตัวเล็กน้อย ในขณะที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันบริเวณตรงกลางชิ้นงาน มีปริมาณโพรงอากาศมากขึ้น โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C มีลักษณะคล้ายกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C แต่มีจำนวนโพรงอากาศลดลง โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันบริเวณตรงกลาง ด้านล่างชิ้นงานมีขนาดใหญ่ การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐาน โฟมค่อนข้างมาก รูปทรงชิ้นงานบริเวณส่วนปลายมีลักษณะหด

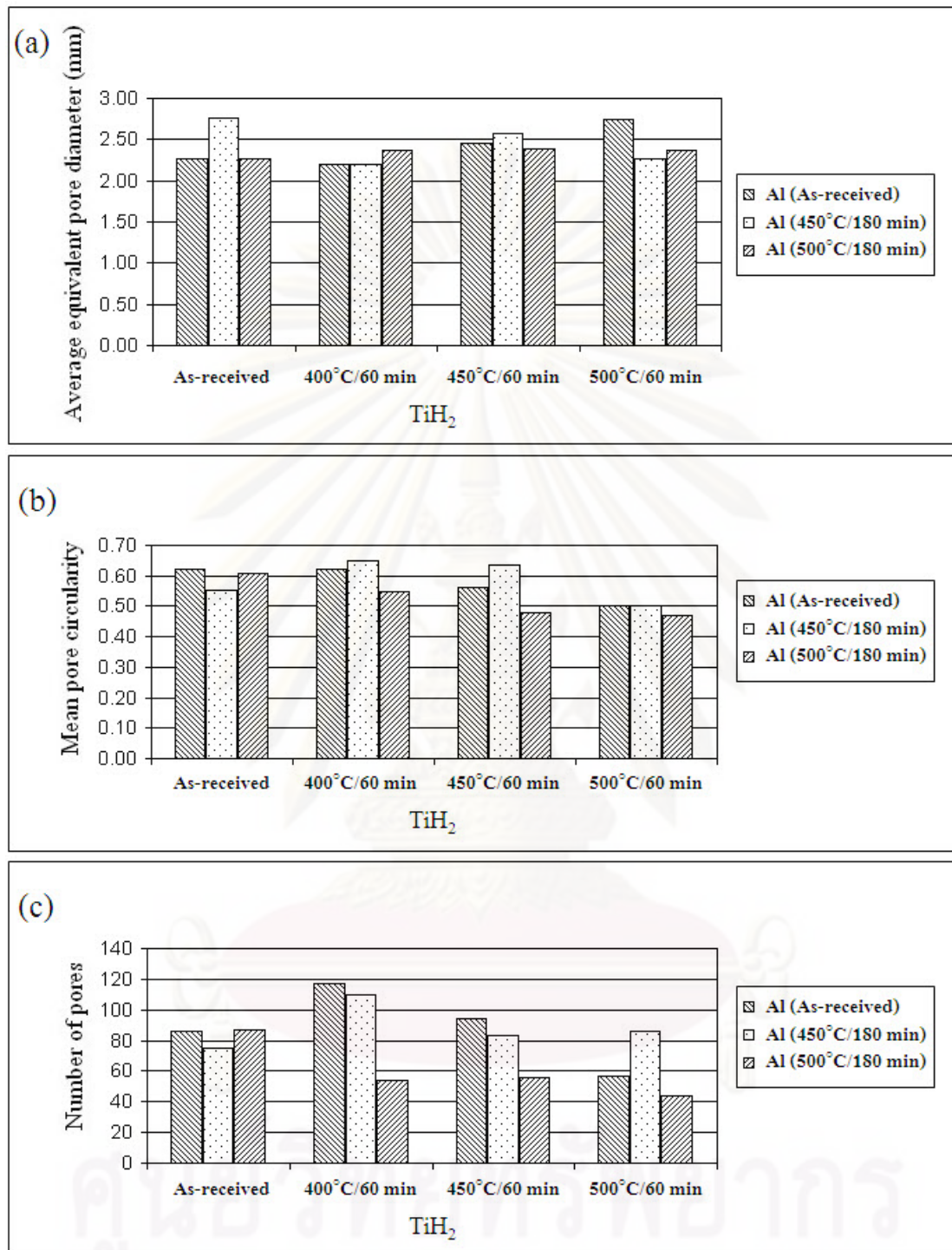
ตัวเล็กลงแต่ไม่มากนัก มีปริมาณโพรงอากาศน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง  $TiH_2$  แบบอื่นๆ

โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  ผสมกับผง  $TiH_2$  แบบต่างๆ พบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันบริเวณตรงกลางและด้านล่างชิ้นงานการกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโฟมไม่มากนัก รูปทรงชิ้นงานเป็นทรงกระบอก ในขณะที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันบริเวณตรงกลางและด้านล่างชิ้นงานไม่มากนัก การกระจายตัวของโพรงอากาศสม่ำเสมอ บริเวณตรงกลางจนถึงด้านบนชิ้นงาน มีปริมาณโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้น มีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโฟมไม่มากนัก โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  มีลักษณะคล้ายกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  แต่มีการกระจายตัวของโพรงอากาศสม่ำเสมอมากกว่า ในขณะที่ปริมาณโพรงอากาศลดลง โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันบริเวณด้านล่างของชิ้นงาน การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโฟมเพิ่มมากขึ้น รูปทรงชิ้นงานหดตัวบริเวณส่วนปลายชิ้นงาน

โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันบริเวณตรงกลางและด้านล่างชิ้นงานมีปริมาณโพรงอากาศสูง มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันไม่มากนัก การกระจายตัวของโพรงอากาศสม่ำเสมอ มีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโฟมไม่มากนัก ในขณะที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันบริเวณตรงกลางและด้านล่างชิ้นงาน มีปริมาณโพรงอากาศลดลงการกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโฟมค่อนข้างมาก รูปทรงชิ้นงานมีการหดตัวและฉีกขาดบริเวณส่วนปลาย โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  และ  $500^{\circ}C$  มีลักษณะคล้ายกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  แต่มีจำนวนโพรงอากาศลดลง และมีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโฟมมากขึ้นตามลำดับ

รูปที่ 4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ (a) ขนาดเฉลี่ย, (b) ความกลมเฉลี่ย, (c) ปริมาณของโพรงอากาศ, ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Image J โดยผลที่ได้คือ



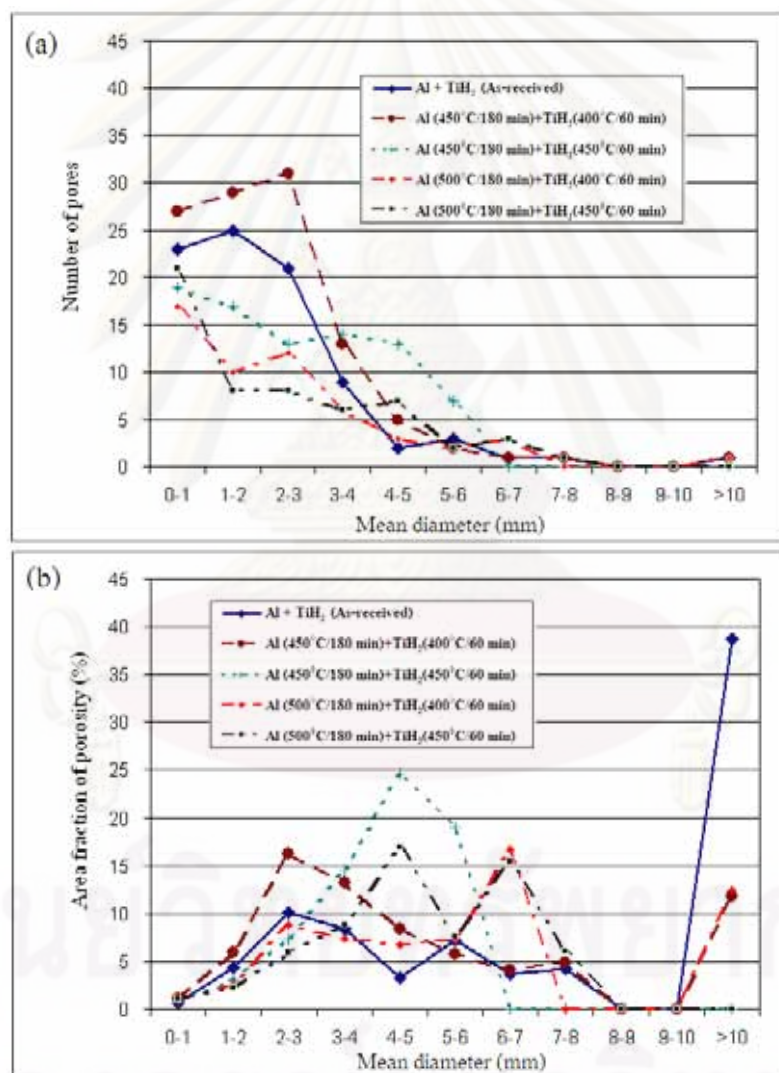


รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ (a) ขนาดเฉลี่ย, (b) ความกลมเฉลี่ย, (c) ปริมาณของโพรงอากาศ

- **ขนาดเฉลี่ย** จากรูปที่ 4.8 (a) เปรียบเทียบค่าขนาดเฉลี่ยโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมพบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์มีขนาดเฉลี่ยโพรงอากาศสูงและเริ่มมีขนาดเฉลี่ยโพรงอากาศลดลงเมื่อผสมกับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C แต่มี



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ(a) ปริมาณของโพรงอากาศ, (b) % สัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศที่ขนาดของโพรงอากาศต่างๆ พบว่าโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C ที่ขนาดโพรงอากาศเล็ก (น้อยกว่า 3 mm) มีปริมาณโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้นและมากที่สุด โดยมีปริมาณ 31 โพรงที่ขนาด 3 mm. และมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น ทางด้านสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศนั้น ที่ขนาดโพรงอากาศเล็ก (น้อยกว่า 3 mm) มีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้นและมากที่สุดเช่นกัน โดยมีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศสูงสุดที่ 16 % ที่ขนาด 3 mm. และมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ (a) ปริมาณของโพรงอากาศ, (b) % สัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศ ที่ขนาดของโพรงอากาศต่างๆ

โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ ที่ขนาดโพรงอากาศเล็ก (น้อยกว่า 3 mm) มีปริมาณโพรงอากาศต่ำลงมา โดยมีปริมาณ 25 โพรงที่ขนาด 2 mm. และมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น ทางด้านสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศนั้น ที่ขนาดโพรงอากาศเล็ก (น้อยกว่า 3 mm) มีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในระดับปานกลางไปจนถึงขนาด 3 mm. และมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น แต่มีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศสูงสุดที่ 39 % ขนาดมากกว่า 10 mm.

โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  ที่ขนาดโพรงอากาศเล็ก (น้อยกว่า 3 mm) มีปริมาณโพรงอากาศปานกลาง โดยมีปริมาณ 19 โพรงที่ขนาด 1 mm. แต่มีแนวโน้มน้อยลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น (3-5 mm) มีปริมาณโพรงอากาศมากที่สุดในช่วงโพรงอากาศขนาด 3-5 mm. โดยมีปริมาณ 14 โพรงที่ขนาด 4 mm. และมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น ทางด้านสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในระดับปานกลางในช่วงโพรงอากาศขนาด 3-5 mm. แต่มีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศมากที่สุดในช่วง 4-5 mm. แต่มีไปจนถึงขนาด 3 mm. โดยมีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศสูงสุด 24 % ที่ขนาด 5 mm. และมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น

โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  และโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  มีแนวโน้มน้อยลงถึงกัน โดยที่ขนาดโพรงอากาศเล็ก (น้อยกว่า 3 mm) มีปริมาณโพรงอากาศปานกลางและมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น ทางด้านสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศมีแนวโน้มน้อยลงถึงกัน โดยที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  เริ่มมีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในช่วงที่ขนาดโพรงอากาศ 6-7 mm. โดยมีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศสูงสุด 17 % ที่ขนาด 7 mm. และแนวโน้มน้อยลงพื้นที่ของโพรงอากาศลดลง ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  เริ่มมีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมาก. ในช่วงที่ขนาดโพรงอากาศ 3-5 mm โดยมีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศสูงสุด 17 % ที่ขนาด 5 mm. แต่ลดลงอย่างมากในช่วงที่ขนาดโพรงอากาศ 5-6 mm และกลับมามีสัดส่วนพื้นที่ของโพรงอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมาก. ในช่วงที่ขนาดโพรงอากาศ 6-7 mm และมีแนวโน้มน้อยลงพื้นที่ของโพรงอากาศลดลง

จากรูปที่ 4.9 จึงเห็นได้ว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  ที่ขนาดโพรงอากาศเล็ก (น้อยกว่า 3 mm) มีปริมาณโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศสูงที่สุด คือ 31 โพรง และ 16 % ตามลำดับ

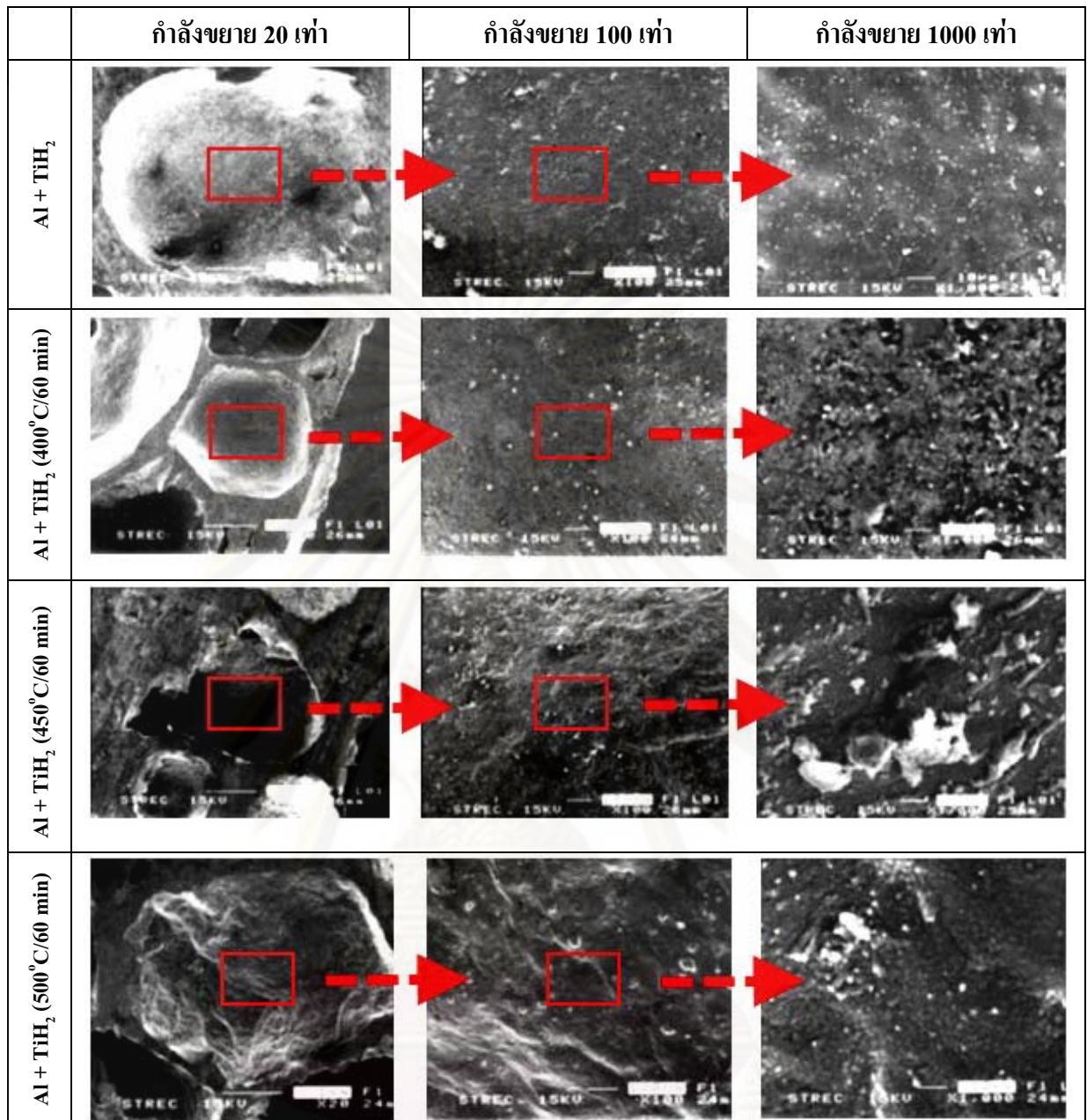
#### 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

##### 4.4.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ

รูปที่ 4.10 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  แบบต่างๆพบว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  และ  $450^{\circ}C$  มีลักษณะผิวผนังโพรงอากาศที่มีความราบเรียบค่อนข้างมาก ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ผสมกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  ผิวผนังโพรงอากาศมีความหยาบเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก โดยมีลักษณะคล้ายเนินเขาเล็กๆ

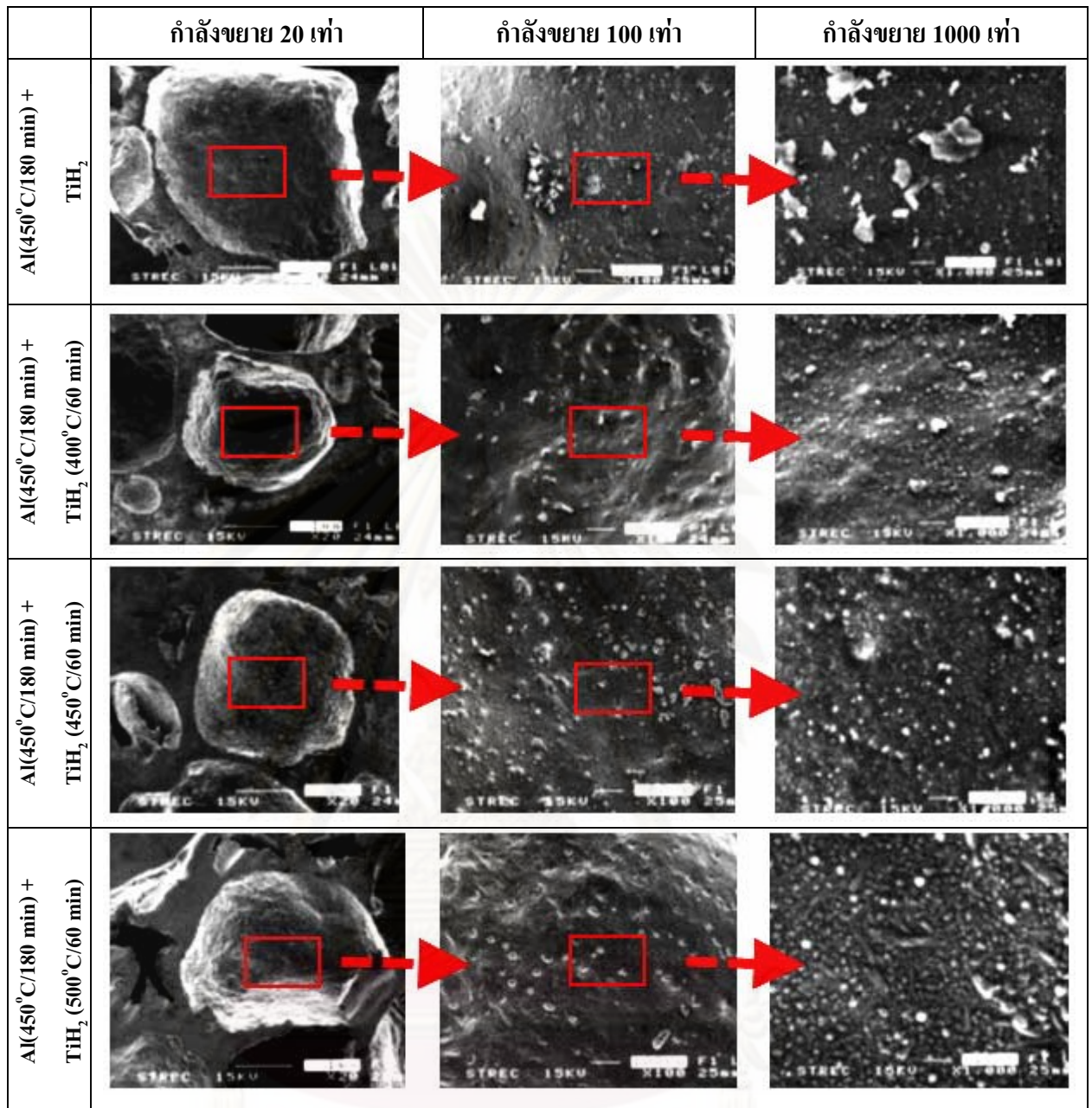


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ กับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ

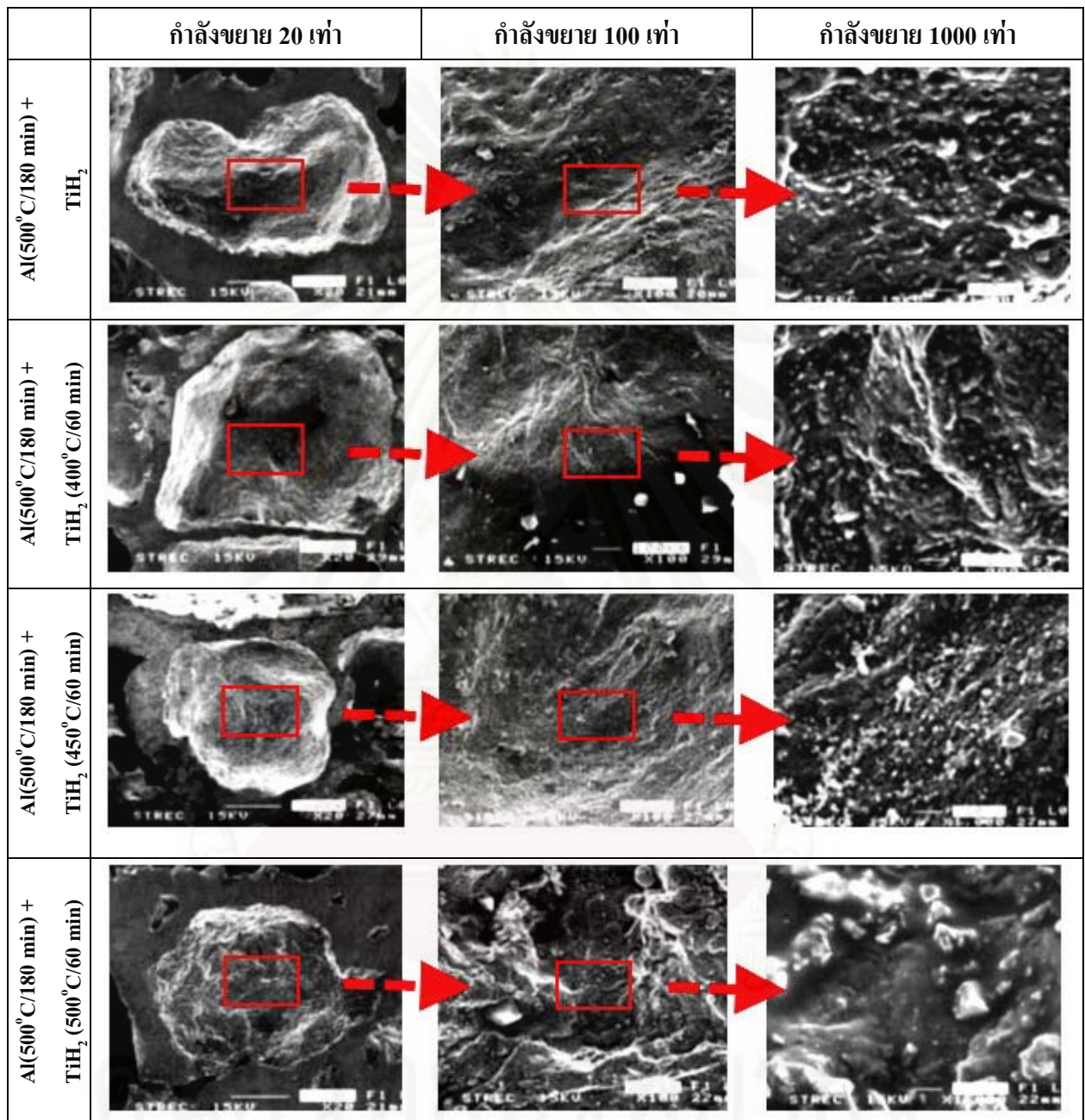
รูปที่ 4.11 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ โดยพบว่าโฟม อะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ทุกแบบผสมผิวผนัง โพรงอากาศมีลักษณะที่หยาบเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ โดยมี ลักษณะคล้ายเนินเขาเล็กๆ อยู่ทั่วบริเวณผนังโพรงอากาศ โดยที่ลักษณะผิวผนังโพรงอากาศไม่ เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.11 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโพลีเอทิลีนที่ใส่ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ

รูปที่ 4.12 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโพลีเอทิลีนที่ใส่ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ พบว่าผิวผนังโพรงอากาศของโพลีเอทิลีนที่ใส่ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> ทุกแบบผสม มีลักษณะผิวผนังโพรงอากาศที่มีความหยาบของผนังโพรงอากาศมากที่สุด เมื่อเทียบกับโพลีเอทิลีนที่ใส่ผง Al บริสุทธิ์ และโพลีเอทิลีนที่ใส่ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ

450°C โดยลักษณะผิวผนังโพรงอากาศคล้ายเนินเขาเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ผง  $\text{TiH}_2$  ยังคงไม่มีผลต่อผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม

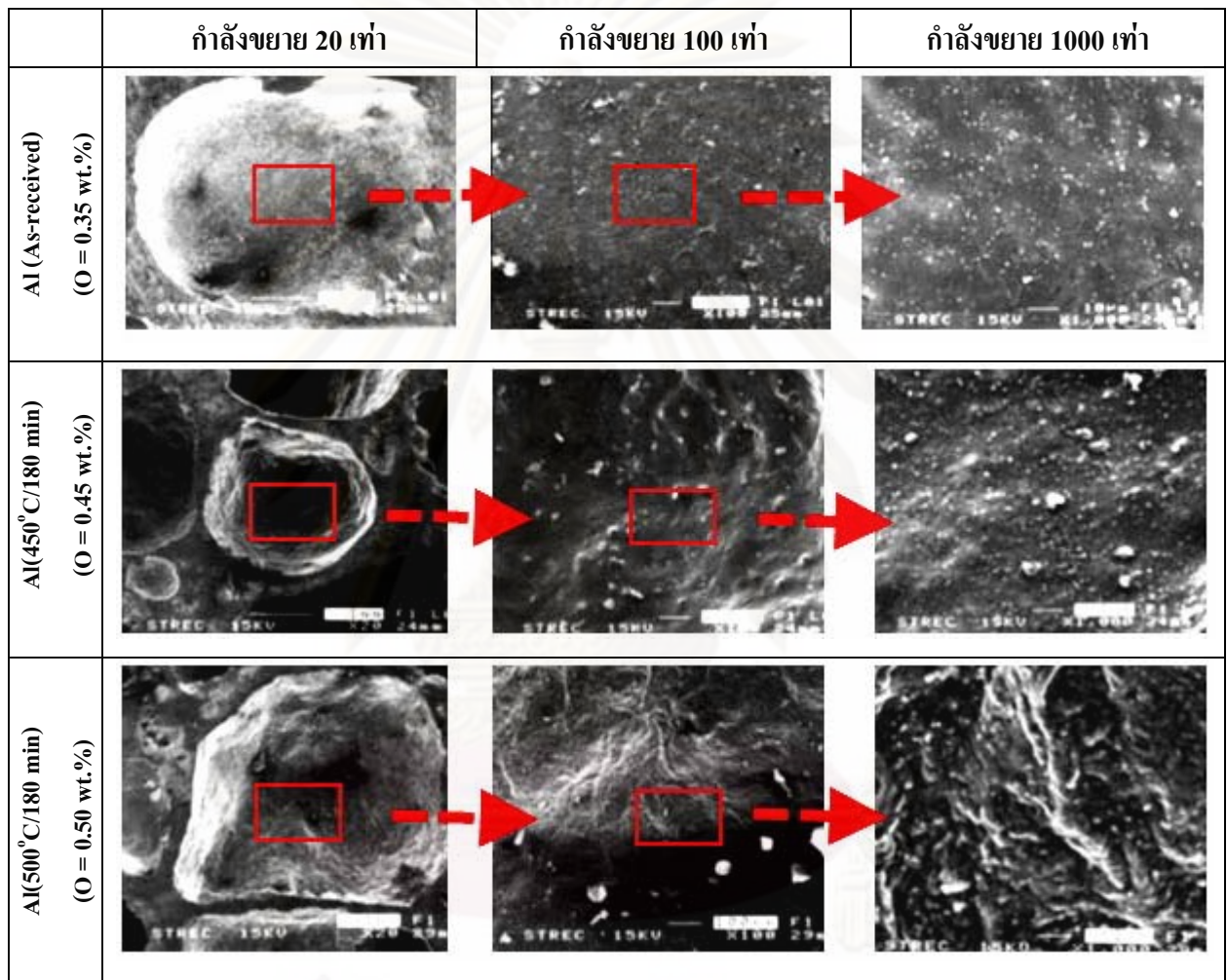


รูปที่ 4.12 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง  $\text{TiH}_2$  แบบต่างๆ

รูปที่ 4.13 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่มีปริมาณออกซิเจนบรรจุแตกต่างกัน ซึ่งเป็นการสรุปผลของปริมาณออกซิเจนต่อผนังโพรงอากาศ พบว่าผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ที่มีปริมาณออกซิเจน 0.35



wt.% มีลักษณะผิวผนังโพรงอากาศมีความราบเรียบมากที่สุด โดยที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ที่มีปริมาณออกซิเจน 0.45 wt.% เริ่มมีลักษณะผิวผนังโพรงอากาศมีความหยาบมากขึ้น และโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C ที่มีปริมาณออกซิเจน 0.50 wt.% มีลักษณะผิวผนังโพรงอากาศมีความหยาบมากที่สุด

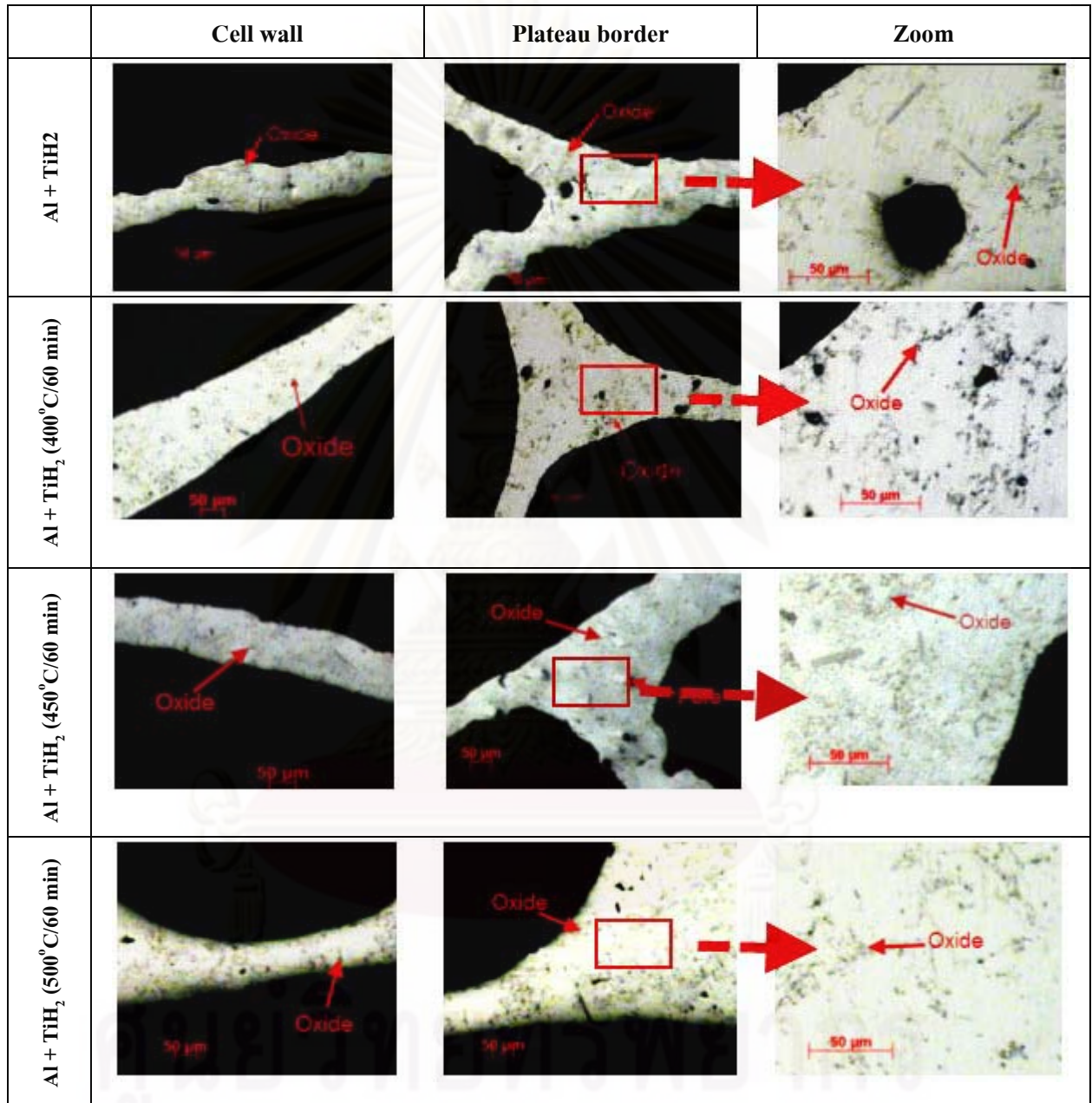


รูปที่ 4.13 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศ ของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่มีปริมาณออกซิเจนบรรจุแตกต่างกัน

#### 4.4.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศ

รูปที่ 4.14 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  แบบต่างๆ ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (OM) พบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  ทุกแบบผสม ที่บริเวณผนังโพรงอากาศและ Plateau

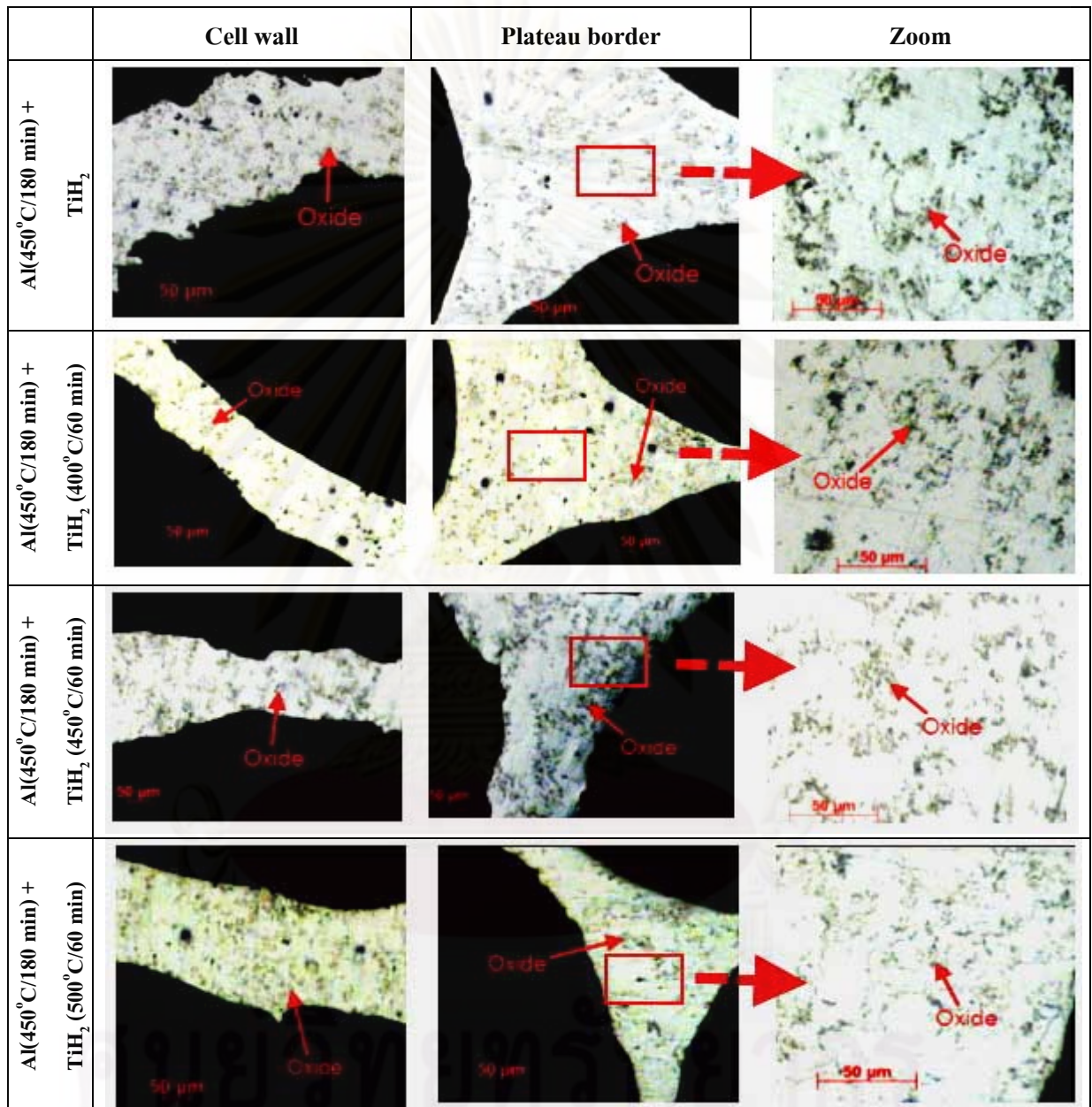
border มีลักษณะออกไซด์ที่คล้ายคลึงกัน โดยออกไซด์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน และมีปริมาณไม่มากนัก กระจายตัวสม่ำเสมออยู่ทั่วบริเวณผนังโพรงอากาศและ Plateau border โดยการผสมผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อนไม่มีผลต่อออกไซด์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.14 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  แบบต่างๆ

รูปที่ 4.15 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง  $TiH_2$  แบบต่างๆ พบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง  $TiH_2$  ทุกแบบผสม ที่บริเวณผนังโพรง

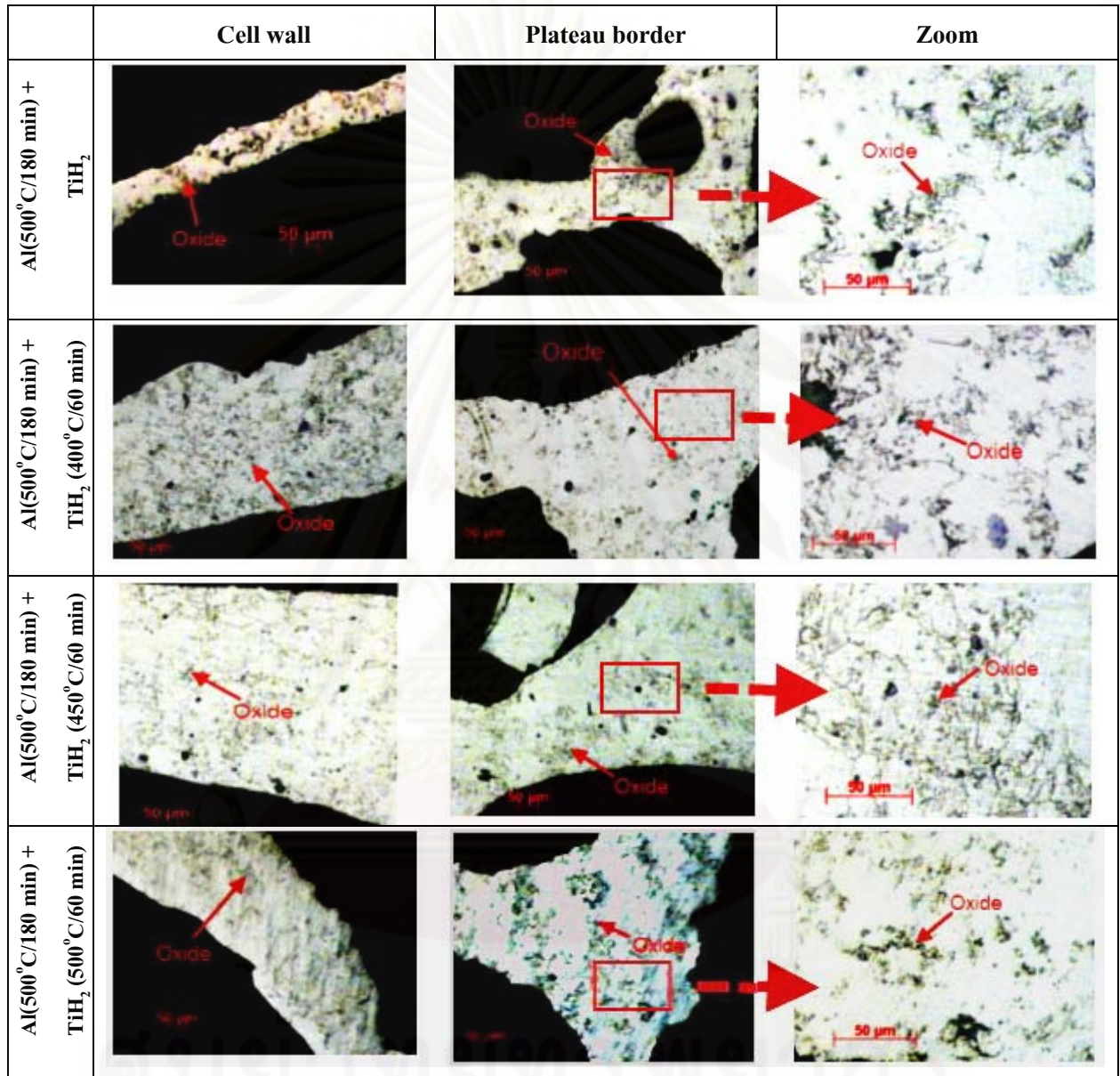
อากาศและ Plateau border มีปริมาณออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ การกระจายตัวของออกไซด์อยู่ทั่วไปในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม โดยลักษณะออกไซด์ที่พบว่ามีลักษณะที่เป็นกลุ่มก้อน และบางส่วนมีลักษณะออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 4.15 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ

รูปที่ 4.16 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ พบว่าโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> ทุกแบบผสม ที่บริเวณผนังโพรง

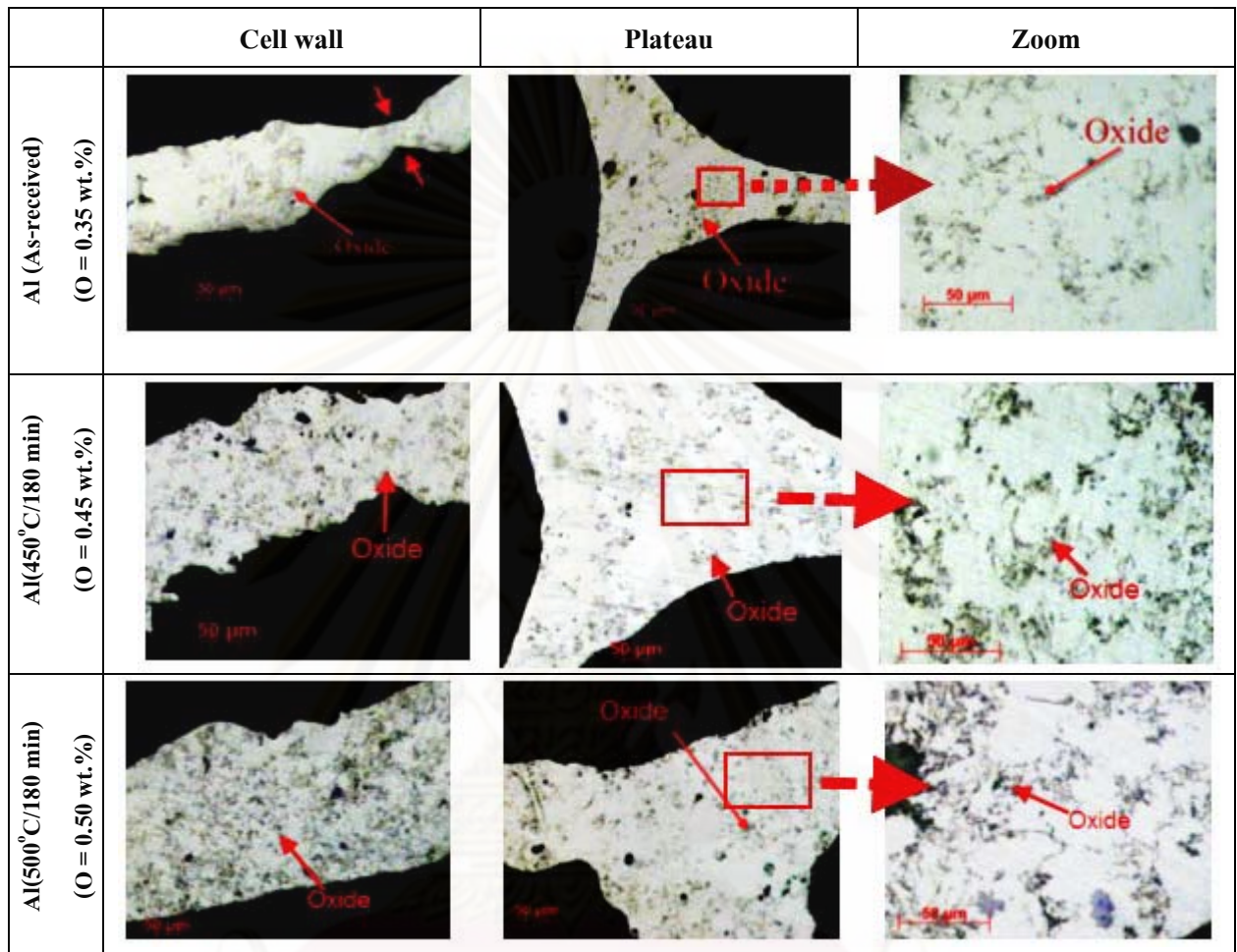
อากาศและ Plateau border พบว่ามีลักษณะคล้ายกับโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C แต่มีปริมาณออกไซด์ที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด และมีออกไซด์ที่เชื่อมต่อกันเพิ่มขึ้นมากกว่า



รูปที่ 4.16 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C กับผง TiH<sub>2</sub> แบบต่างๆ

รูปที่ 4.17 รูปเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน พบว่าโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ มีปริมาณออกไซด์ไม่มากนัก โดยออกไซด์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C และ

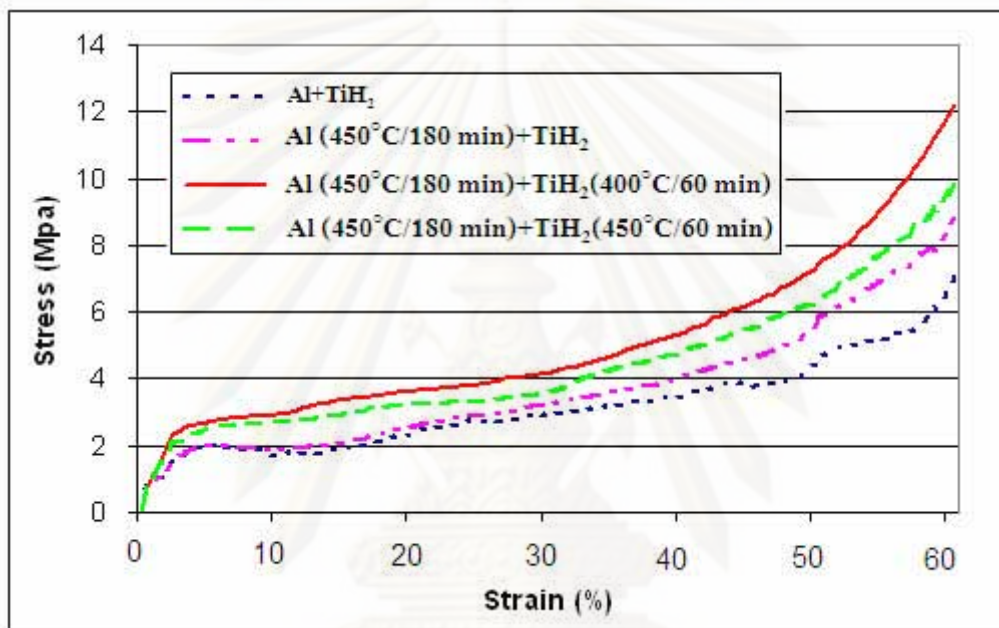
500°C มีปริมาณออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ และออกไซด์มีลักษณะเป็นออกไซด์ที่เชื่อมต่อกันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 รูปเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน

#### 4.5 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.18 แสดงการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม โดยใช้ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ และผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C และ 450°C เทียบกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ และตารางที่ 4.6 แสดงค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.18 กราฟการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	E <sub>60%</sub> (MJ/cm <sup>3</sup> )	η
Al + TiH <sub>2</sub>	0.70	1.97	1.9	0.46
Al(450°C) + TiH <sub>2</sub>	0.72	2.00	2.25	0.43
Al(450°C) +TiH <sub>2</sub> (400°C)	0.68	2.71	3.07	0.42
Al(450°C) +TiH <sub>2</sub> (450°C)	0.68	2.52	2.66	0.45

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ พบว่าความเค้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของความเครียด และความเค้นจะตกลงเล็กน้อยในช่วง 10% ความเครียด จากนั้น

ความเค้นค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนถึงช่วง 50%-60% ความเครียด ความเค้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ลักษณะความเค้นคล้ายกับโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ แต่ในช่วง 10%-50% ความเครียดความเค้นค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นกว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์เล็กน้อย และในช่วง 50%-60% ความเครียดความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C มีความเค้นสูงที่สุด โดยความเค้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของความเครียด และความเค้นค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 5%-40% ความเครียด จากนั้นความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 40%-60% ความเครียด ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C มีลักษณะคล้ายกับโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C แต่มีความเค้นต่ำกว่าเล็กน้อยในช่วง 40% ความเครียด โดยที่ความเค้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของความเครียด และความเค้นค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 5%-50% ความเครียด จากนั้นความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 50%-60% ความเครียด

จากตารางที่ 4.6 พบว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ มีค่าความแข็งแรง  $\sigma_y$  จุดคราก (Yield strength) และค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน ( $E_{60}$ ) ต่ำกว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C ค่าความแข็งแรง  $\sigma_y$  จุดคราก (Yield strength) และค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน ( $E_{60}$ ) มีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 2.71 MPa และ 3.07 MJ/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ และมีค่าลดลงเมื่อโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C กับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน ( $\eta$ ) ของโพลีอะลูมิเนียมมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน โดยโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ มีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน ( $\eta$ ) สูงที่สุดอยู่ที่ 0.46

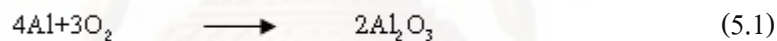
## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al และผง TiH<sub>2</sub>

##### 5.1.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al

ผง Al บริสุทธิ์ที่ใช้ในการทดลอง จากการวัดปริมาณออกซิเจนที่บรรจุในผง พบว่ามีปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 0.35 wt.% โดยปริมาณออกซิเจนขึ้นอยู่กับบรรยากาศที่ใช้การผลิตผง Al ด้วยวิธี Atomization ในขณะที่ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนเป็นเวลา 180 นาทีในอากาศ และให้ออกซิเจนไหลผ่านในเตาอบด้วยอัตรา 500 cm<sup>3</sup>/min ที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.45 และ 0.50 wt.% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Asavavisitchai and Kennedy [7] ซึ่งใช้ผง Al บริสุทธิ์ที่มีปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 0.244 wt.% และอบให้ความร้อนผง Al เป็นเวลา 180 นาทีในอากาศที่อุณหภูมิ 500°C และ 550°C เป็นผลให้มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.572 และ 0.851 wt.% ตามลำดับ โดยที่ออกซิเจนในผง Al เปรียบเทียบได้เป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากออกซิเจนทำปฏิกิริยากับ Al เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์หรืออะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ปกคลุมผิวของผง Al ดังสมการเคมีที่ (5.1)



โดยที่อัตราเร็วในการเกิดออกไซด์ชั้น หาได้จากสมการที่ (5.2) [22]

$$\omega = K_c \log(Ct + A) \quad (5.2)$$

โดยที่  $\omega$  = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่  
 $K_c$  = อัตราเร็วตามกฎอัตราเชิงลอการิทึม  
 $t$  = เวลา  
 $C, A$  = ค่าคงที่

ทั้งนี้ยังมีปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณออกไซด์ของผง Al อื่นๆอีก เช่น บรรยากาศในการผลิตผง Al การกระจายตัวของผงเพื่อให้ผิวสัมผัสกับแก๊สในขณะที่อบให้ความร้อน โดยออกไซด์ที่พบในโพลีมีหลายลักษณะเช่น ฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ มีความหนาประมาณ 10-50 nm กลุ่มออกไซด์ขนาดเล็ก (Small oxide clusters) ออกไซด์มีลักษณะเกาะกลุ่มกัน



มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $1.5 \mu\text{m}$  ฝังลงบนผิวของผง Al โดยมีความหนาของชั้นผิวออกไซด์ประมาณ  $500 \text{ nm}$  [18] กลุ่มอนุภาคออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network particle) คือการรวมตัวกันของฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) หรือกลุ่มออกไซด์ขนาดเล็ก (Small oxide clusters) เป็นกลุ่มก้อนมีลักษณะคล้ายอนุภาคของแข็ง แต่มีสัดส่วนโดยปริมาตรประมาณ 30-35 % เกิดขึ้นเนื่องจากออกไซด์เกิดการแตกหักเนื่องจากความเค้นเฉือนในระหว่างการอัดขึ้นรูป Precursor และไหลเป็นอิสระในน้ำโลหะและรวมตัวกันเนื่องจากการเกาะยึดทางกล (Mechanical interlocking) กลุ่มอนุภาคออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network particle) นี้หากอยู่โดดเดี่ยวอาจเรียกว่าเป็นกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) ก็ได้ โดยมีขนาดประมาณ  $50-100 \mu\text{m}$  ในขณะที่ถ้ามีปริมาณออกไซด์ที่สูงขึ้นหรือมีกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) รวมตัวกันมากขึ้น ออกไซด์จะมีลักษณะเชื่อมต่อกัน (Oxide network) [7,16]

### 5.1.2 ผลของการอบให้ความร้อนผง $\text{TiH}_2$

การอบให้ความร้อนผง  $\text{TiH}_2$  เป็นผลให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น และในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของผง  $\text{TiH}_2$  สูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิการหลอมเหลวของ Al ที่อยู่ที่ประมาณ  $660^\circ\text{C}$  และเป็นช่วงของอุณหภูมิ Solidus/Liquidus ซึ่งเป็นช่วงที่การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ดีที่สุด เนื่องจากผง  $\text{TiH}_2$  ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ขึ้น จากการทดลองพบว่าผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์มีสีเทาดำ ผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$ , และ  $500^\circ\text{C}$  มีสีน้ำตาล สีน้ำเงิน และสีฟ้า ตามลำดับ ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงชั้นความหนาของออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ไม่พบลักษณะความแตกต่างของออกไซด์บนผิวของผง  $\text{TiH}_2$  บริสุทธิ์และ ผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน [22] ทั้งนี้จากที่เคยมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆในการอบให้ความร้อนเช่น เวลาในการอบ อุณหภูมิในการอบ และจากการศึกษาของ Kennedy and Lopez [15] พบว่าผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง  $450^\circ\text{C}$  -  $530^\circ\text{C}$  จะเกิดชั้นสารประกอบ Oxyhydride ในขณะที่ผง  $\text{TiH}_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า  $630^\circ\text{C}$  จะเกิดชั้นสารประกอบ  $\text{Ti}_3\text{O}$  และชั้นสารประกอบ  $\text{TiO}_2$  และจากการศึกษาของ Matijasevic et al. [22] โดยอบให้ความร้อนผง  $\text{TiH}_2$  ที่อุณหภูมิ  $480^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 180 นาที พบว่าชั้นออกไซด์มีความหนาประมาณ  $100 \text{ nm}$  โดยที่ชั้นสารประกอบ  $\text{Ti}_3\text{O}$  อยู่ภายในและชั้นสารประกอบ  $\text{TiO}_2$  อยู่ภายนอก ซึ่งชั้นของสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของ  $\text{TiH}_2$  เพิ่มสูงขึ้น [15,22] ในขณะที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนผง  $\text{TiH}_2$  สูงขึ้นทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของ  $\text{TiH}_2$  สูงขึ้นทำให้สูญเสียแก๊ส  $\text{H}_2$  ไปบางส่วนในขณะที่อบให้ความร้อน โดยที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนสูงขึ้น การสูญเสียแก๊ส  $\text{H}_2$  จะสูงขึ้นตามลำดับ [6,15,17,22] ดังตารางที่ 4.3 แสดงผล DSC และ TG ของผง  $\text{TiH}_2$  ที่เป็นการบ่งบอกถึงอุณหภูมิการสลายตัวที่เพิ่มสูงขึ้นและน้ำหนักที่

สูญเสียไปเนื่องจากการอบให้ความร้อน ผง  $TiH_2$  และจากผล DSC และ TG ของผง  $TiH_2$  ที่ได้จากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่เพิ่มสูงขึ้นและน้ำหนักที่สูญเสียของผง  $TiH_2$  มีความแตกต่างจากการศึกษาของบุคคลอื่น โดยมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของลักษณะผง  $TiH_2$  อุณหภูมิในการอบให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อน และเวลาในการอบให้ความร้อน จึงเป็นผลให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้นและน้ำหนักที่สูญเสียของผง  $TiH_2$  ของการศึกษาแต่ละบุคคลมีค่าที่แตกต่างกัน

## 5.2 ผลของการอบให้ความร้อนของผง Al และผง $TiH_2$ ต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

### 5.2.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al ต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

จากการวัดปริมาณออกซิเจนที่บรรจุในผง Al ทั้งหมดพบว่าอยู่ช่วงเดียวกับที่ระดับที่ปริมาณออกซิเจน 0.3-0.6 wt% ซึ่งจากการศึกษาของ Asavavisitchai and Kennedy [7] พบว่าเป็นช่วงที่มีการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมสูง เห็นได้ชัดจากโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนในผง Al อยู่ที่ 0.35 wt% มีการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมสูงที่สุด โดยที่ออกซิเจนที่บรรจุในผง Al เปรียบเทียบได้เป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^\circ C$  และ  $500^\circ C$  มีการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมลดลงตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ

แม้ว่าปริมาณออกซิเจนบรรจุซึ่งอยู่ในช่วงที่มีการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมสูง แต่การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆด้วย เช่น กระบวนการผลิตผง ลักษณะของผง การผสมผง บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม อัตราการให้ความร้อน และอื่นๆ

การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมเป็นผลมาจากกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) ในผนังโพรงอากาศและ Plateau borders และปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.17 แสดงรูปเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน กลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) หรือออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network) เปรียบเหมือนกับอนุภาคของแข็ง โดยเพิ่มความหนืดให้กับน้ำโลหะ ลดพลังงานอิสระผิว (Surface free energy) จึงทำให้การไหลของอะลูมิเนียมซ้าลงและซ้าลงการเกิด Drainage ก่อนที่จะแข็งตัว อีกทั้งเพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังโพรงอากาศ [7,16,18] อย่างไรก็ตามออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นมากมีผลทำให้การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมลดลง เนื่องจากความหนืดของน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความหนืดมีผลต่อการขยายตัวของโพรงอากาศ ทำให้การขยายตัวซ้าลง และทำให้เกิดแรงต้านแรงดันของแก๊ส  $H_2$  เพิ่มสูงขึ้น [16,18] เป็นผลให้การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมลดลง ดัง

รูปที่ 4.3-4.6 แสดงผลการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียม เห็นได้ชัดว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมลดลงตามลำดับ เมื่อเทียบกับโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ เนื่องจากมีปริมาณออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ

### 5.2.2 ผลของการอบให้ความร้อนผง $TiH_2$ ต่อการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียม

ผง  $TiH_2$  ที่ใช้ในการผลิตโพลีอะลูมิเนียมมีผลต่อการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียม โดยที่ผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลให้การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมลดลงตามลำดับ แม้ว่าการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  เป็นผลให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นซึ่งทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของผง  $TiH_2$  เข้าใกล้อุณหภูมิการหลอมเหลวของ Al ที่อุณหภูมิ 660°C และเป็นผลให้มีแก๊ส  $H_2$  ส่วนหนึ่งหลบหนีออกไปในระหว่างการผลิตโพลีอะลูมิเนียม แต่ในขณะที่อบให้ความร้อนเป็นผลให้เกิดการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  บางส่วน ทำให้แรงดันแก๊ส  $H_2$  เพื่อช่วยในการขยายตัวของโพรงอากาศในขณะที่เกิดการขยายตัวลดลง เป็นผลให้การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมลดลงตามลำดับ [6,15,17] ดังรูปที่ 4.3-4.6 แสดงผลการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียม เห็นได้ชัดว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน หากผสมกับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ จะมีการขยายตัวสูงสุดมากกว่าผสมกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่ส่วนผสมของผง Al เหมือนกัน โดยที่การอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีการขยายตัวสูงสุดลดลงตามลำดับ

### 5.2.3 ผลของการอบให้ความร้อนของผง Al และผง $TiH_2$ ต่อการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียม

การผลิตโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน เป็นผลให้การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมลดลงเมื่อเทียบกับโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน และโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนกับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ เมื่ออุณหภูมิการอบให้ความร้อนของผง Al กับผง  $TiH_2$  สูงขึ้น การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมยิ่งลดลง อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนืดอันเนื่องมาจากปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากการอบให้ความร้อนผง Al แม้ว่าความหนืดช่วยลดพลังงานอิสระผิว จึงทำให้การไหลของอะลูมิเนียมซาลงและขัดขวางการไหลของน้ำโลหะจากด้านบนลงด้านล่างก่อนที่จะแข็งตัว อีกทั้งเพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังโพรงอากาศ แต่ความหนืดที่เพิ่มมากขึ้นมีผลต่อการขยายตัวของโพรงอากาศโดยทำให้การขยายตัวซาลง และทำให้เกิดแรงดันแรงดันของแก๊ส  $H_2$  เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในขณะที่อบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ทำให้แรงดันแก๊ส  $H_2$  เพื่อช่วยในการขยายตัวของโพรงอากาศลดลง เป็นผลให้การขยายตัวสูงสุดของโพลี

อะลูมิเนียมลดลงตามลำดับ [6,15-16,18,22] ดังรูปที่ 4.3-4.6 แสดงผลการขยายตัวสูงสุดของโพมอะลูมิเนียม เห็นได้ชัดว่าโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ การขยายตัวสูงสุดลดลงตามลำดับเมื่อผสมกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น การขยายตัวสูงสุดลดลงตามลำดับเมื่อผสมกับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน การขยายตัวสูงสุดลดลงตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิการอบให้ความร้อนของผง Al หรือผง  $TiH_2$  สูงขึ้น

### 5.3 ผลของการอบให้ความร้อนของผง Al และผง $TiH_2$ ต่อโครงสร้างโพมอะลูมิเนียม

#### 5.3.1 ผลของการอบให้ความร้อนผง Al ต่อโครงสร้างโพมอะลูมิเนียม

ปริมาณออกไซด์ของผง Al มีผลต่อโครงสร้างของโพมอะลูมิเนียมอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.7 แสดงภาพโครงสร้างมหภาคของโพมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด พบว่าโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ แม้ว่าจะมีการขยายตัวสูงสุดของโพมอะลูมิเนียมสูงแต่การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันขนาดใหญ่เนื่องจากมีปริมาณออกไซด์น้อยที่สุด ในขณะที่โพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  และ  $500^{\circ}C$  กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ มีปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้โครงสร้างโพรงอากาศดีขึ้น เนื่องจากความหนืดเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวบริเวณผนังโพรงอากาศและ Plateau borders ลดลง การรวมตัวของผนังโพรงอากาศรวมทั้ง การไหลของน้ำโลหะจากด้านบนลงด้านล่าง ลดลงและผนังโพรงอากาศมีความแข็งแรงขึ้น [7,16]

ลักษณะออกไซด์ที่พบในโพมอะลูมิเนียมพบว่า มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) และเมื่อปริมาณออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network) ดังรูปที่ 4.17 แสดงรูปเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการอบให้ความร้อนผง Al โดยออกไซด์เกิดการแตกหักเนื่องจากความเค้นเฉือนในระหว่างการอัดขึ้นรูป Precursor และไหลเป็นอิสระในน้ำโลหะและรวมตัวกันเนื่องจากการเกาะยึดทางกล (Mechanical interlocking) ในระหว่างการผลิตโพมอะลูมิเนียม โดยมีสัดส่วนโดยปริมาตรประมาณ 30-35 % และอนุภาคออกไซด์ที่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย (Oxide network) จะขาดเป็นชิ้นย่อยเป็นผลมาจากการเกิดนิวเคลียสและการโตของเกรนอะลูมิเนียม (Nucleation and Growth) เมื่อน้ำโลหะเริ่มแข็งตัวและมีออกไซด์บางส่วนที่ยังคงอยู่ตามขอบเกรนภายหลังจากการผลิตโพมอะลูมิเนียม [16,18] โดยออกไซด์ที่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายจะช่วยลดความโค้งของผนังโพรงอากาศ ทำให้ลดการไหลของน้ำโลหะจากบริเวณผนังโพรงอากาศไปที่ Plateau borders [16,18] และออกไซด์ที่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายทำให้เกิดแรงดันสวนทางกันหรือ Disjoining pressure เป็นผลทำให้ที่ผนังโพรงอากาศมี

ลักษณะไม่ราบเรียบ และมีความหนาของผนังโพรงอากาศมากขึ้น ขึ้นอยู่กับขนาดและการเรียงตัวของออกไซด์ [16,18] ดังรูปที่ 4.10-4.13 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI ที่มีปริมาณออกไซด์แตกต่างกัน โดยที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์มีผิวผนังโพรงอากาศค่อนข้างราบเรียบ ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นผิวผนังโพรงอากาศมีความหยาบเพิ่มขึ้นตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณออกไซด์เพิ่มมากขึ้นผิวผนังโพรงอากาศมีความหยาบเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้โพลีอะลูมิเนียมมีเสถียรภาพมากขึ้น [16,19] และรูปที่ 4.9 (b) แสดงสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศของโพรงอากาศขนาด 3-6 mm ของโพลีอะลูมิเนียมที่ผลิตจากผง AI ที่ผ่านการอบให้ความร้อน มีค่าสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศที่สูงกว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ผลิตจากผง AI บริสุทธิ์

### 5.3.2 ผลของการอบให้ความร้อนผง $TiH_2$ ต่อโครงสร้างโพลีอะลูมิเนียม

โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนสามารถปรับปรุงโครงสร้างโพรงอากาศได้ ดังรูปที่ 4.17 แสดงภาพโครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด โดยที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ แม้ว่าจะมีการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมสูงแต่การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการบิดงอของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันขนาดใหญ่ ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  และ  $450^{\circ}C$  มีโครงสร้างโพรงอากาศที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J จากโครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิการหลอมเหลวของ AI เป็นผลให้จำนวนแก๊ส  $H_2$  ที่เล็ดลอดออกไปในระหว่างการผลิตโพลีอลดลง และการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในขณะที่อบให้ความร้อนน้อยที่สุด แม้ว่าผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิการหลอมเหลวของ AI และจำนวนแก๊ส  $H_2$  เล็ดลอดออกไปในระหว่างการโพลีอลดลง เป็นผลให้โครงสร้างโพรงอากาศมีความสม่ำเสมอ และโพรงอากาศมีความกลมมากขึ้น แต่การอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงอาจมีผลต่อโครงสร้างโพรงอากาศเนื่องจากเกิดการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ที่มากเกินไปในระหว่างการอบให้ความร้อนทำให้แรงดันแก๊สไม่เพียงพอในการขยายโพรงอากาศ ทำให้โพรงอากาศมีรูปร่างที่ไม่กลม มีลักษณะแบนตั้งฉากกับแรงอัดของ Precursor [6,15,22]

### 5.3.3 ผลของการอบให้ความร้อนผง AI และผง $TiH_2$ ต่อโครงสร้างโพลีอะลูมิเนียม

โพลีอะลูมิเนียมที่ผลิตจากผง AI ที่ผ่านการอบให้ความร้อนและผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนให้ผลต่อโครงสร้างโพรงอากาศที่หลากหลาย โดยมีทั้งการขยายตัวสูงสุดที่ต่ำและมีโครงสร้างโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ ไปจนถึงการขยายตัวสูงสุดที่สูงและมีโครงสร้างโพรงอากาศ

ที่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการอบให้ความร้อนผง Al เป็นผลให้เกิดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวัดปริมาณออกซิเจนที่บรรจุในผง Al พบว่าที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.45 และ 0.50 wt.% ตามลำดับ โดยที่ออกซิเจนในผง Al เปรียบเทียบได้เป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากออกซิเจนทำปฏิกิริยากับ Al เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์หรืออะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ปกคลุมผิวของผง Al ลักษณะออกไซด์ที่พบในโพรอะลูมิเนียมพบว่า มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) และเมื่อปริมาณออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการอบให้ความร้อนผง Al มีแนวโน้มที่เป็นลักษณะออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network) เนื่องจากเมื่อนำผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนไปผสมกับผง  $TiH_2$  เพื่อทำ Precursor ในระหว่างการอัดขึ้นรูป ออกไซด์จะเกิดการแตกหักเนื่องจากแรงตัดเฉือนและไหลเป็นอิสระในน้ำโลหะในระหว่างการโพรอะลูมิเนียมเกิดการรวมตัวกันเนื่องจากการเกาะยึดทางกล (Mechanical interlocking) โดยมีสัดส่วนโดยปริมาตรประมาณ 30-35 % และออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network) จะขาดเป็นชิ้นย่อยเมื่อเกิดนิวเคลียสและเกิดการโตของเกรนอะลูมิเนียม (Nucleation and Growth) [7,16,18] จากรูปที่ 4.17 แสดงรูปเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรอากาศของโพรอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์และที่ผ่านการอบให้ความร้อนเห็นได้ชัดว่าโพรอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) บริเวณที่ไม่มีออกไซด์อยู่ผนังโพรอากาศจะบางลงในขณะที่โพรอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อน ซึ่งมีปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network) กลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) หรือออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network) เปรียบเหมือนกับอนุภาคของแข็ง โดยเพิ่มความหนืดให้กับน้ำโลหะ โดยที่ออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน ช่วยลดความโค้งของผนังโพรอากาศ ทำให้ลดการไหลของน้ำโลหะจากบริเวณผนังโพรอากาศไปที่ Plateau borders [16,18] ออกไซด์ที่เชื่อมต่อกันทำให้เกิดแรงดันสวนทางกันหรือ Disjoining pressure เป็นผลให้ที่ผนังโพรอากาศมีลักษณะไม่ราบเรียบ และมีความหนาของผนังโพรอากาศมากขึ้น ขึ้นอยู่กับขนาดและการเรียงตัวของออกไซด์ โดยที่ถ้ามีการเรียงตัวของออกไซด์ในผนังโพรอากาศจากด้านหนึ่งเชื่อมต่อกันไปจนถึงอีกด้านหนึ่ง แรงดันสวนทางจะถูกส่งผ่านการจัดเรียงตัวกันของอนุภาค ทำให้ผนังโพรอากาศมีความหนาและมีลักษณะไม่ราบเรียบ อีกทั้งออกไซด์ที่เชื่อมต่อกันยังช่วยลดพลังงานอิสระผิว จึงทำให้การไหลของอะลูมิเนียมช้าลงและขัดขวางการไหลของน้ำโลหะจากด้านบนลงด้านล่างก่อนที่จะแข็งตัว เป็นผลให้โพรอะลูมิเนียมมีเสถียรภาพมากขึ้น [7,16,18] รูปที่ 4.10-4.13 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรอากาศ ของโพรอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่มีปริมาณออกไซด์แตกต่างกัน โดยที่โพรอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์มีผิวผนังโพรอากาศค่อนข้างเรียบ ในขณะที่โพรอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นผิวผนังโพรอากาศมีความหยาบเพิ่มขึ้นตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณออกไซด์เพิ่มมากขึ้นผิวผนังโพรอากาศมีความหยาบเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นมากมีผลต่อโครงสร้างโพรอากาศ เนื่องจากมี

ความหนืดน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความหนืดมีผลต่อการขยายตัวของโพรงอากาศ ทำให้การขยายตัวช้าลง และทำให้เกิดแรงดันแรงดันของแก๊ส  $H_2$  เพิ่มสูงขึ้น [16,18]

การอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  เป็นผลให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น และในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของผง  $TiH_2$  สูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิการหลอมเหลวของ Al ซึ่งเป็นช่วงที่ดีที่สุดในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม ทำให้จำนวนแก๊ส  $H_2$  ไล่ตลอดออกไปในระหว่างการโฟมลดลง และการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในขณะอบให้ความร้อนน้อยที่สุด แต่การอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงอาจมีผลต่อโครงสร้างโพรงอากาศ เนื่องจากเกิดการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ที่มากเกินไปในระหว่างการอบให้ความร้อนทำให้แรงดันแก๊สไม่เพียงพอในการขยายโพรงอากาศ ทำให้โพรงอากาศมีรูปร่างที่ไม่กลม มีลักษณะแบนตั้งฉากกับแรงอัดของ Precursor [6,15,22]

จากการทดลองพบว่าผลจากการอบให้ความร้อนผง Al เป็นปัจจัยสำคัญต่อโครงสร้างโพรงอากาศมากกว่าผลจากการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ทั้งนี้เนื่องจากว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ชนิดเดียวกันกับผง  $TiH_2$  แบบต่างๆ โครงสร้างโพรงอากาศมีความแตกต่างกันน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al แบบต่างๆกับผง  $TiH_2$  ชนิดเดียวกัน ซึ่งมีความแตกต่างของโพรงอากาศที่มากกว่า ดังรูปที่ 4.10-4.13 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม เห็นได้ชัดว่าผิวผนังโพรงอากาศมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณออกไซด์ของ Al เพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากการอบให้ความร้อนผง Al ในขณะที่ผลจากการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ไม่มีผลต่อผิวผนังโพรงอากาศมากนัก และจากการทดลองพบว่า โครงสร้างที่ดีที่สุดคือโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตจากผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^\circ C$  ผสมกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^\circ C$  ซึ่งโครงสร้างโพรงอากาศมีความแข็งแรง เนื่องจากออกไซด์ในผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau borders อีกทั้งแรงดันแก๊สจากผง  $TiH_2$  สูงพอในการขยายโพรงอากาศ เนื่องจากสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในระหว่างการอบให้ความร้อนน้อย อีกทั้งจำนวนแก๊ส  $H_2$  ไล่ตลอดออกไปในระหว่างการผลิตโฟมลดลง ในขณะที่โฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตจากผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า  $450^\circ C$  หรือผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า  $400^\circ C$  เมื่อผสมกันในอย่างใดอย่างหนึ่ง มีแนวโน้มที่คุณสมบัติโครงสร้างโพรงอากาศลดลง โดยที่ขนาดเฉลี่ยโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความกลมและจำนวนโพรงอากาศค่อยๆลดลง ดังรูปที่ 4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าของโพรงอากาศ ขนาดเฉลี่ย ความกลมเฉลี่ย ปริมาณของโพรงอากาศ เนื่องจากการอบให้ความร้อนของผง Al ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปให้ออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้ความหนืดของน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ในขณะที่การอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปเป็นผลให้การสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในขณะอบให้ความร้อนสูงขึ้นไป ทำให้แรงดันแก๊สในการขยายโพรงอากาศลดลง [6,15-16,22]

#### 5.4 ผลของการอบให้ความร้อนของผง AI และผง TiH<sub>2</sub> ต่อความสามารถในการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียม

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียม โดยลักษณะการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียมจะมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic) คือบริเวณที่เส้นกราฟความเค้นและความเครียดมีค่าความชันคงที่ บริเวณที่ราบ (Plateau regime) คือบริเวณที่ค่าความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่มากนักหรือค่าความเค้นคงที่หรือเกือบจะคงที่ และการอัดแน่น (Densification) คือบริเวณที่ค่าความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [24] จะเห็นได้ชัดว่าโครงสร้างโพรงอากาศมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียม โดยที่โม่อะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์ ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ มีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศที่ไม่ดี เป็นผลให้มีคุณสมบัติทางกลที่ต่ำที่สุด ดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียม ในขณะที่โม่อะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> บริสุทธิ์ และที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นตามลำดับ ในขณะที่โม่อะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ผสมกับผง TiH<sub>2</sub> ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C มีคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด เนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศที่ดีที่สุด โดยที่ความหนาแน่นของโม่ จำนวนโพรงอากาศ ขนาดและรูปร่าง รวมถึงการกระจายตัวของโพรงอากาศ มีส่วนสำคัญต่อความสามารถในการรับแรงอัดของโม่ [3, 8] ความหนาแน่นของโม่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของโม่ที่เพิ่มมากขึ้น แสดงว่ามีวัสดุเนื้อพื้นที่เป็นโครงสร้างของโม่มากขึ้น ทำให้มีการดูดซับและกระจายแรงได้มากกว่า ในขณะที่จำนวนโพรงอากาศ ขนาดและรูปร่าง รวมถึงการกระจายตัวของโพรงอากาศส่งผลโดยที่หากจำนวนโพรงอากาศมาก หมายความว่าความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้นลดลง ซึ่งเป็นผลให้ขนาดของโพรงอากาศต่อพื้นที่ลดลงด้วย โดยที่ขนาดของโพรงอากาศที่เล็กจะมีความหนาแน่นของผนังโพรงอากาศที่หนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้โครงสร้างที่มีขนาดโพรงอากาศที่เล็ก มีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างที่มีขนาดโพรงอากาศที่ใหญ่ และเนื่องจากการที่ขนาดโพรงอากาศที่ใหญ่มีผนังโพรงอากาศที่บาง เป็นผลให้เกิดรอยพับและรอยแตก (Cracks) ได้ง่ายกว่า ในขณะที่การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศที่สม่ำเสมอทั่วทั้งโม่จะมีความแข็งแรงอัด และการดูดซับพลังงานที่มากกว่าโม่ที่การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ เพราะโพรงอากาศที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอขณะที่รับความเค้นจะเกิดความไม่สมดุลของแต่ละตำแหน่งเฉพาะที่รับแรงกระทำจึงรับความเค้นและดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า [8,12-14]



## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการอบให้ความร้อนผงอะลูมิเนียม และผลของการอบให้ความร้อนผงไทเทเนียมไฮไดรด์ ต่อความสามารถในการโฟม โครงสร้าง และคุณสมบัติทางกล ของโฟมอะลูมิเนียม

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

1. การอบให้ความร้อนผง AI บริสุทธิ์ที่มีปริมาณออกซิเจนที่บรรจุในผงอยู่ที่ 0.35 wt.% เป็นผลให้มีปริมาณออกซิเจนที่บรรจุในผงเพิ่มขึ้น โดยการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.45 และ 0.50 wt.% ตามลำดับ โดยที่ออกซิเจนในผง AI เปรียบเทียบได้เป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น

2. การอบให้ความร้อนผง AI เป็นผลให้มีออกไซด์ของ AI เพิ่มขึ้น มีผลต่อการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียม โดยที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีการขยายตัวสูงสุดของโฟมลดลงตามลำดับ เมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์ เนื่องจากมีปริมาณออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ

3. การอบให้ความร้อนผง AI เป็นผลให้มีออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยลักษณะออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่พบในโฟมอะลูมิเนียมพบว่า มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนออกไซด์ (Oxide clusters) และเมื่อปริมาณออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะออกไซด์ที่เชื่อมต่อกัน (Oxide network)

4. การอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  เป็นผลให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น แต่ในการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ทำให้เกิดการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในขณะที่อบให้ความร้อน โดยที่อุณหภูมิการอบให้ความร้อนสูงขึ้น ทำให้การสูญเสียแก๊ส  $H_2$  เพิ่มสูงขึ้น

5. การอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมลดลงตามลำดับ เนื่องจากการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในขณะที่อบให้ความร้อน เห็นได้จากโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมลดลงตามลำดับ โดยที่โฟมอะลูมิเนียมที่ใช้ผง AI บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์มีการขยายตัวสูงสุด

6. การอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิการหลอมเหลวของ AI ทำให้โครงสร้างโพรงอากาศมีความสม่ำเสมอ และโพรง

อากาศมีความกลมมากขึ้น โดยที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ แม้ว่าจะมีการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมสูงแต่การกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ มีการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศและรวมตัวกันขนาดใหญ่ ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  และ  $450^{\circ}C$  มีโครงสร้างโพรงอากาศที่ดีขึ้น

7. การอบให้ความร้อนผง Al และการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ทำให้การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมลดลง โดยที่โพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน เป็นผลให้การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมลดลงเมื่อเทียบกับโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al บริสุทธิ์กับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อน และโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนกับผง  $TiH_2$  บริสุทธิ์ เมื่ออุณหภูมิการอบให้ความร้อนของผง Al กับผง  $TiH_2$  สูงขึ้น การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมยิ่งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น และการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  ในขณะที่อบให้ความร้อนผง  $TiH_2$

8. การอบให้ความร้อนผง Al และการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ให้ผลต่อโครงสร้างโพรงอากาศที่หลากหลาย ทั้งนี้เนื่องจากการอบให้ความร้อนผง Al เป็นผลให้เกิดออกไซด์เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิในการสลายตัวของผง  $TiH_2$  สูงขึ้นและการสูญเสียแก๊ส  $H_2$  เนื่องจากการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  โดยที่โพลีอะลูมิเนียมที่ผลิตจากผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  ผสมกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  มีโครงสร้างโพรงอากาศที่ดีที่สุด

9. การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียม พบว่าโพลีอะลูมิเนียมที่ใช้ผง Al ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}C$  ผสมกับผง  $TiH_2$  ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  มีคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด เนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศที่ดีที่สุด

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตโพลีอะลูมิเนียมโดยศึกษาผลของการอบให้ความร้อนผง Al และผลของการอบให้ความร้อนผง  $TiH_2$  ในวิธีการอบให้ความร้อนผง Al และผง  $TiH_2$  อาจได้ผลจากการอบให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะของผง  $TiH_2$  การกระจายตัวของผง อุณหภูมิในการอบให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อน เวลาในการอบให้ความร้อน ที่แตกต่างกัน

เนื่องจากในการวัดการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมของผู้ทดลอง ใช้การวัดในช่วงเวลาทุก 15 วินาที เพื่อหาการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียม หากมีการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้วัดการ

ขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมที่ดีกว่านี้ จะช่วยลดชิ้นงานในการทดสอบลงได้และได้ค่าการขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมที่เที่ยงตรงมากขึ้น

การผลิตโพลีอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผงนั้น มีข้อจำกัดอยู่ในด้านการผลิตซ้ำ (Reproducible) ของโพลีอะลูมิเนียมที่ทำได้ค่อนข้างยาก ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโพลีจึงแสดงแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ถ้าสามารถควบคุมการผลิตโพลีให้ได้โพลีที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันได้ จะทำให้การศึกษาสมบัติต่างๆของโพลีมีความชัดเจนยิ่งขึ้น



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Gleich group, Aluminium products [ออนไลน์],  
แหล่งที่มา <http://www.gleich.de/international/products> [2552, ธันวาคม 18]
- [2] University of Cambridge, Acoustic Properties of Metallic Foams [ออนไลน์],  
แหล่งที่มา <http://www.rmutphysics.com> [2552, ธันวาคม 19]
- [3] Rossella Surace, Luigi A.C. de Fillippis, Antonio D. Ludovico and Giancarlo Boghetich.  
Experimental analysis of the effect of control factors on aluminium foam produced  
by powder metallurgy. Estonian Acad. Sci.Eng 13 (2007) : 156-167.
- [4] J. Banhart. Manufacture, characterization and application of cell metals and metal foams.  
Progress in Materials Science 46 (2001) : 559-632.
- [5] I. Duarte and J. Banhart. A study of aluminium foam formation-kinetics and  
Microstructure. Acta Materialia 48 (2000) : 2349-2362.
- [6] A.R. Kennedy. The effect of TiH<sub>2</sub> heat treatment on gas release and foaming in Al- TiH<sub>2</sub>  
preforms. Scripta Materialia 47 (2002) : 763-767.
- [7] S. Asavavisitchai and A. R. Kennedy. Effect of powder oxide content on the expansion and  
stability of PM-route Al foams. Journal of Colloid and Interface Science 297  
(2006) : 715-723.
- [8] S. Esmaeelzadeh, A. Simchi and D. Lehmhus. Effect of ceramic particle addition on the  
foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi7 foam.  
Materials Science and Engineering A424 (2006) : 290-299.
- [9] F.von Zeppelin, M. Hirscher, H. Stanzick and J. Banhart. Desorption of hydrogen from  
blowing agents used for foaming metals. Composites Science and Technology 63  
(2003) : 2293-2300.
- [10] F. Simancik, K. Behulova, and L.Bors. Effect of ambient atmosphere on metal foam  
expansion, in Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Cellular Metal  
and Metal Foaming Technology, Bremen, 2001.
- [11] B. Hugo and L. Faria. Material model of metallic cellular solids. Computers&Structures  
62 (1997) : 1049-1057.
- [12] F. Han, Z. Zhu and J. Gao. Compressive Deformation and Energy Absorbing  
Characteristic of Foamed Aluminium. Metallurgical and Materials Transactions  
29A : 198-2497.

- [13] Gibson, L.J. Mechanical Behavior of Metallic Foams. Journal of Materials Science 30 (2000): 191-227.
- [14] Kenesei, P., Kadar, Cs., Rajkovits, Zs., and Lendvai. The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams. Scripta Materialia 50 (2004) : 295-300.
- [15] A.R. Kennedy and V.H. Lopez. The decomposition behavior of as-received and oxidized TiH<sub>2</sub> foaming-agent powder. Materials Science and Engineering A 2003 : 258-263
- [16] Korner, C., M. Arnold and R.F. Singer. Metal foam stabilization by oxide network particles. Materials Science and Engineering A (2005) : 28-40.
- [17] S. Asavavisitchai and A. R. Kennedy. Decomposition behaviour of as-received and Heat treated TiH<sub>2</sub> powder, in Proceeding of the 4<sup>th</sup> Thailand Material Science and Technology Conference, Bangkok, 2006.
- [18] A. Dudka, F.G. Moreno, J. Banhart. Structure and distribution of oxides in aluminium foam. Acta Materialia (2008) : 3990–4001
- [19] Korner, C. Foam formation mechanisms in particle suspensions applied to metal foams. Materials Science and Engineering A 495 (2008) : 227-235.
- [20] W. Deqing and S. Ziyuan. Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam. Materials Science and Engineering A 361 (2003) : 45-49.
- [21] G. Kaptay. Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles. Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects 230 (2004) : 67-80.
- [22] B. Matijasevic, S. Fiechter and J. Banhart. Modification of TiH<sub>2</sub> for improved aluminium foam manufacture. Acta mater 54 (2006) : 1887-1900
- [23] แม้น อมรสิทธิ์. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป, 2547.
- [24] B. Huko and L. Faria. Material model of metallic cellular solids. Computers & Structures 62 (1997) : 1049-1057.

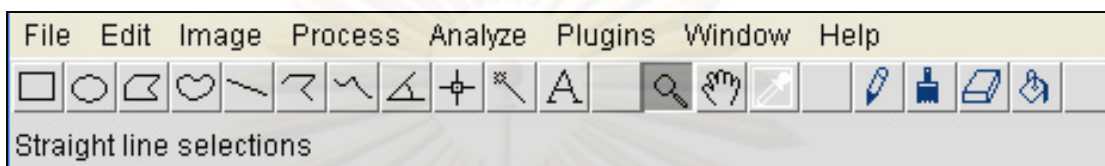


ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การวิเคราะห์รูปโครงสร้างด้วยโปรแกรม Image J

การวิเคราะห์รูปโครงสร้างโคมอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J เวอร์ชัน 1.36b โดยรูปที่จะทำการวิเคราะห์ต้องใช้รูปที่มีนามสกุล .BMP ดังรูปที่ 1ก(ก) การวิเคราะห์รูปมีขั้นตอนดังนี้

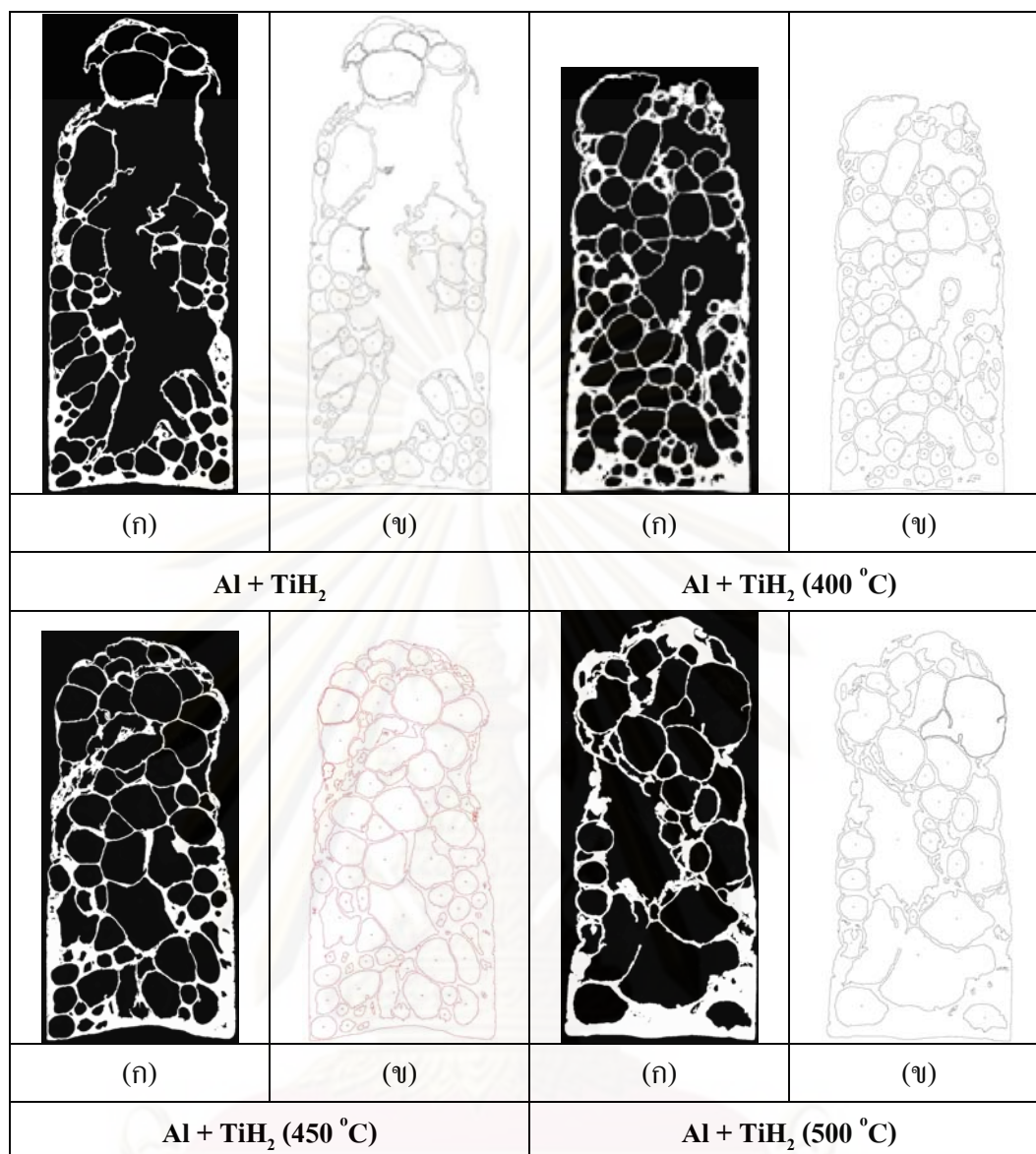


รูปที่ 1ก แสดงลักษณะของหน้าต่างโปรแกรม Image J 1.36b

- เปิดโปรแกรม Image J 1.36b ขึ้นมา โดยโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 2ก
- ทำการตั้งค่าสเกลในโปรแกรมให้ตรงกับสเกลในรูปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูป โดยเข้าไปที่ Analyze > Set scale
- ทำการ Crop รูปเฉพาะบริเวณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ (รูปที่ 2ก(ก))
- เปลี่ยนชนิดของรูปจาก RGB เป็น 8-bit
- ปรับความชัดของรูปภาพโดยใช้คำสั่ง Image > Adjust > Threshold
- ทำการวิเคราะห์รูปด้วยคำสั่ง Analyze > Analyze particle โดยกำหนดขนาดพื้นที่ที่ต้องการวิเคราะห์ให้อยู่ในช่วง  $0.0001 - \text{Infinity cm}^2$  ผลการวิเคราะห์จะแสดงออกเป็นค่าพื้นที่โดยแสดงขอบเขตของพื้นที่ที่วิเคราะห์เป็นเส้น ซึ่งแสดงพื้นที่โพรงอากาศแต่ละโพรงอากาศ (รูปที่ 2ก(ข))
- ค่าจำนวนโพรงอากาศ ค่าขนาดโพรงอากาศเฉลี่ย ค่าความกลมโพรงอากาศเฉลี่ย และค่าสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศ ที่คำนวณจากโปรแกรม Image J แสดงอยู่ในตารางที่ 1ก

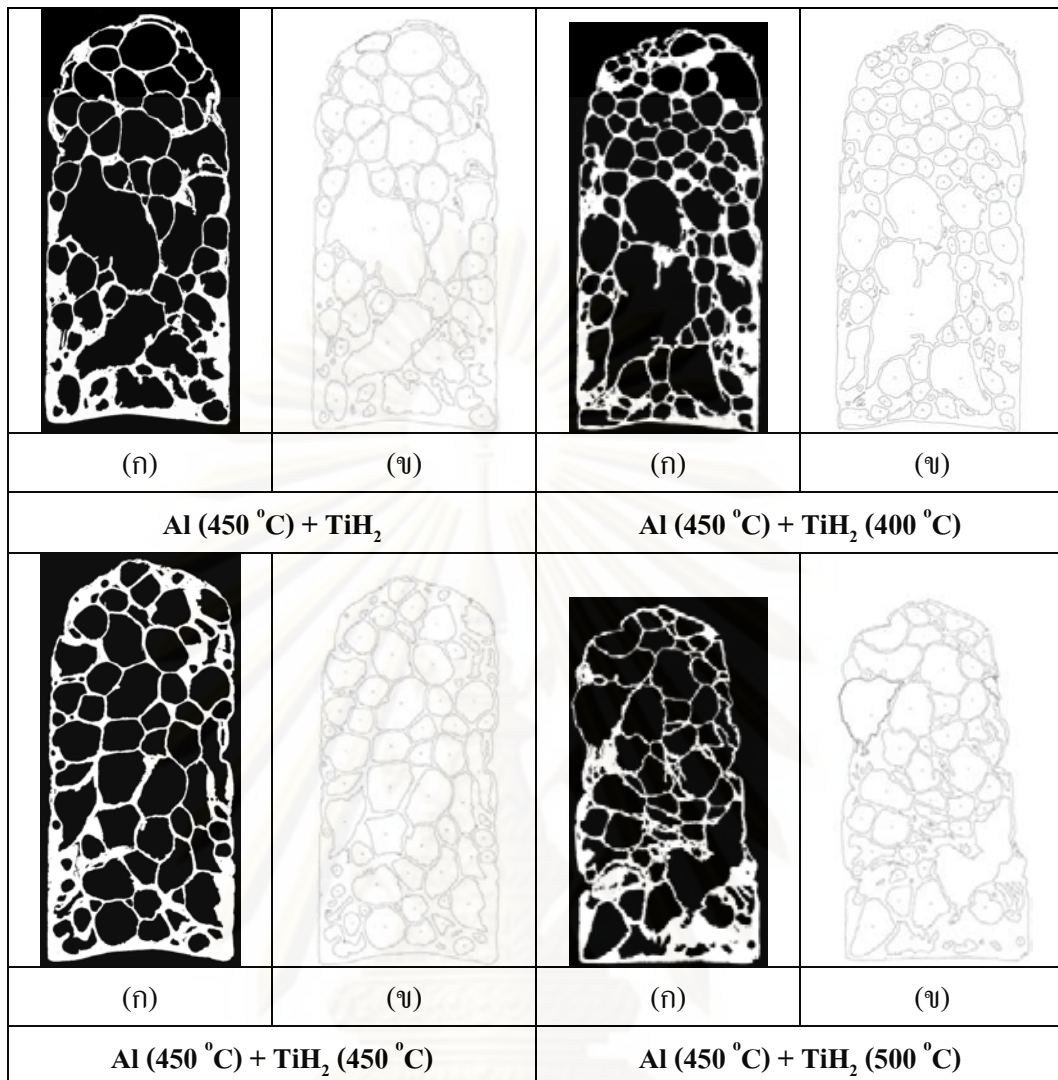
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

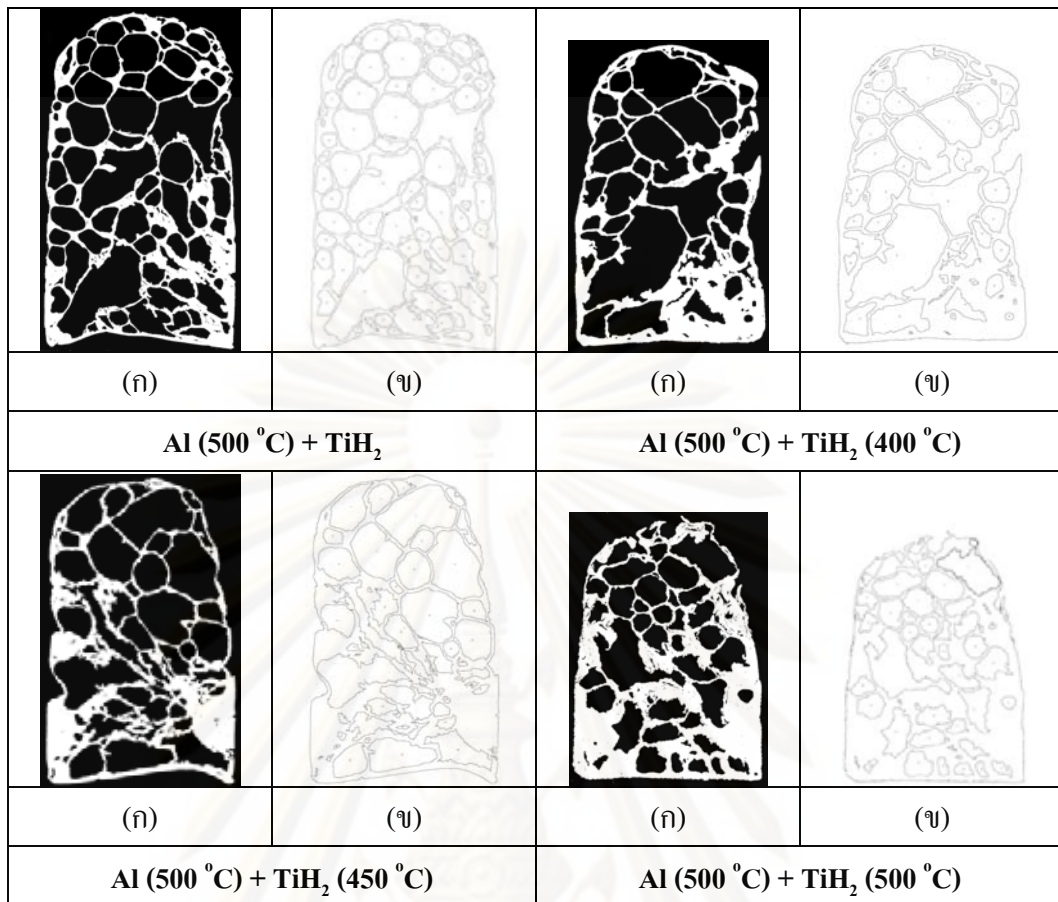


รูปที่ 2ก แสดงผลวิเคราะห์รูปโครงสร้างโพลีเมอร์ด้วยโปรแกรม Image J





รูปที่ 2ก (ต่อ) แสดงผลวิเคราะห์รูปโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมด้วยโปรแกรม Image J



รูปที่ 2ก (ต่อ) แสดงผลวิเคราะห์รูปโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมด้วยโปรแกรม Image J

Condition	Number of pores	Average equivalent pore diameter (mm)	Mean pore circularity	Area fraction of porosity (%)
Al + TiH <sub>2</sub>	86	2.27	0.62	81
Al + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	117	2.20	0.62	73
Al + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	94	2.46	0.56	75
Al + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	57	2.74	0.50	71
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub>	75	2.77	0.55	74
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	110	2.20	0.65	71
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	83	2.57	0.64	69
Al (450 °C) + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	86	2.26	0.50	70
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub>	87	2.26	0.61	69
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (400 °C)	54	2.37	0.55	62
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (450 °C)	56	2.39	0.48	63
Al (500 °C) + TiH <sub>2</sub> (500 °C)	44	2.36	0.47	49

ตารางที่ 1ก แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J จากโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่มีการขยายตัวสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นายอารีฟิน หมัดแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2521
ที่อยู่	23 หมู่ 5 แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนศาลาคู้ ปี พ.ศ. 2533 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนมัธยมวัดหนองจอก พ.ศ.2540 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร ปี 2542 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี พ.ศ.2546
โทรศัพท์	08-6849-3001

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย