

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2021

การผลิตโพลีเอไมด์โดยใช้ลูกบอลเหล็กที่ออกแบบเป็นตัวสร้างรูป

จุฑานนท์ พุฒประเสริฐ
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Metallurgy Commons](#)

Recommended Citation

พุฒประเสริฐ, จุฑานนท์, "การผลิตโพลีเอไมด์โดยใช้ลูกบอลเหล็กที่ออกแบบเป็นตัวสร้างรูป" (2021). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 5480.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/5480>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การผลิตโคมอะลูมิเนียมโดยใช้ลูกบอลเกลือที่ออกแบบเป็นตัวสร้างรูปนูน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MANUFACTURE OF ALUMINIUM FOAMS USING TAILORED SALT BALLS AS SPACE
HOLDER



Mr. Jutanon Boonprasert

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering
Department of Metallurgical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2021
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้ลูกบอลเกลือกที่ออกแบบเป็น ตัวสร้างรูพรุน
โดย	นายจุฑานนท์ บุญประเสริฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.นิธิ แสนอาจหาญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ จุ้ยเจิม)

จุฑานนท์ บุญประเสริฐ : การผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้ลูกบอลเกลือที่ออกแบบเป็นตัว
สร้างรูพรุน. (MANUFACTURE OF ALUMINIUM FOAMS USING TAILORED SALT
BALLS AS SPACE HOLDER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุน
แบบเปิดด้วยการใช้ลูกบอลเกลือเป็นตัวสร้างรูพรุนรวมถึงสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม โดย
เริ่มต้นศึกษาการผลิตและสมบัติของลูกบอลเกลือซึ่งมีรูปร่างทรงกลม โดยเลือกใช้ลูกบอลเกลือเส้น
ผ่านศูนย์กลาง 5 mm และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC 12 เพื่อนำไปผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วย
วิธีการหล่อแบบแทรกซึมที่ใช้ความดันที่อุณหภูมิ 650 และ 700°C โดยใช้แรงดันจากแก๊สอาร์กอน
1 และ 2 bar และใช้ระยะเวลาหลอม 10 และ 30 นาที

ผลการศึกษาสมบัติของลูกบอลเกลือพบว่าโครงสร้างจุลภาคของลูกบอลเกลือหลังการ
เผาผนึกมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดของลูกบอลเกลือสูงขึ้น

กระบวนการผลิตนี้สามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีรูพรุนแบบเปิดได้ ซึ่งโครงสร้างของ
ชิ้นงานโฟมจะมีโพรงอากาศขนาดใหญ่เนื่องจากการแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเพียงบางส่วน
ในชิ้นงานเมื่อใช้อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 bar และเวลา 10 นาที โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน
โฟมประกอบด้วยเนื้อพื้นเมตริกซ์อะลูมิเนียมที่มีเฟสซิลิกอนกระจายตัวอยู่ นอกจากนี้ ความแข็งแรง
อัดของโฟมอะลูมิเนียมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการผลิต โดยที่อุณหภูมิ
700°C ชิ้นงานส่วนใหญ่มีความแข็งแรงจุดครากสูงกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650°C และส่งผลให้การ
ดูดซับพลังงานของชิ้นงานใกล้เคียงกันมากขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มแรงดันจาก 1 เป็น 2 bar
ในขณะที่ระยะเวลาในการหล่อชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานใกล้เคียงกันมาก
ขึ้น และทำให้การดูดซับพลังงานของชิ้นงานสูงขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาการหล่อจาก 10 เป็น 30
นาที

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070144921 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD:

Jutanon Boonprasert : MANUFACTURE OF ALUMINIUM FOAMS USING
TAILORED SALT BALLS AS SPACE HOLDER. Advisor: Assoc. Prof. SEKSAK
ASAVAVISITHCHAI, Ph.D.

The present research aims to study the manufacture of open-cell aluminium foams, using salt balls as space holder, and their mechanical properties. The study began with the production and properties of salt balls that have spherical shapes. The 5 mm diameter salt balls and ADC-12 aluminum alloy were selected to produce aluminum foams at temperatures of 650 and 700°C, under Ar gas pressures of 1 and 2 bar and infiltration times of 10 and 30 minutes.

The result showed that the microstructure of salt balls, after sintering, was more homogeneous. This results in higher compressive strength of the salt balls.

The present manufacturing technique can produce open-cell aluminium foams. The foam structure contained large pores, due to partial infiltration of aluminium melt in the workpiece, when was carried out at 650°C, 1 bar and 10 min. The microstructure of foam specimens composed of aluminium matrix with dispersed silicon phase. The compressive strength of foams depends on the temperature, pressure and time required for production. At 700°C, most specimens had higher yield strengths than the specimen at 650°C, as well as increasing pressures from 1 to 2 bar. The energy absorption also increased when the infiltration time was increased from 10 to 30 minutes.

Field of Study: Metallurgical and Materials Student's Signature

Engineering

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ของหลาย ๆ ฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย สำหรับการสละเวลาให้คำปรึกษาทั้งด้านการเรียนและการทำงานตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วั่งยาว, อาจารย์ ดร.นิธิ แสนอาจหาญ และรองศาสตราจารย์ ดร.ปฐวิภาณ จุ้ยเจิม ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อคิดที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุน 90 ปี ซึ่งช่วยเหลือเรื่องค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับวัสดุ อุปกรณ์ และค่าสนับสนุนอื่น ๆ ที่ช่วยให้งานวิจัยดำเนินไปด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวบุญประเสริฐทุกคน โดยเฉพาะบิดาและมารดาของข้าพเจ้าผู้ซึ่งทำงานหนักมาทั้งชีวิตเพื่อให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้ ทั้งยังเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฑานนท์ บุญประเสริฐ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 โฟมโลหะ.....	4
2.1.1 ประเภทและลักษณะของโฟมโลหะ.....	4
2.1.2 การใช้งานโฟมโลหะ.....	5
2.2 โฟมอะลูมิเนียม.....	6
2.3 การผลิตโฟมโลหะ.....	7
2.3.1 กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะด้วยน้ำโลหะ.....	8
2.3.1.1 การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะโดยตรง.....	8
2.3.1.2 การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สจากสารปล่อยแก๊สในน้ำโลหะ.....	9
2.3.2 กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะด้วยผงโลหะ.....	10

2.3.3 กระบวนการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนโดยใช้วิธี Electro-deposition.....	12
2.3.4 กระบวนการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนด้วยไอโอดีน	13
2.3.5 การผลิตโพลีโพรพิลีนโดยใช้ลูกบอลเกลียวสร้างรูพรุน	14
2.3.6 การใช้ NaCl เป็นตัวสร้างรูพรุน.....	15
2.3.7 การใช้ NaCl เป็นตัวสร้างรูพรุน.....	15
2.3.7.1 การเตรียมลูกบอลเกลียว	15
2.3.7.2 การหล่อโพลีโพรพิลีน.....	19
2.3.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโพลีโพรพิลีน	20
2.3.8.1 ความแข็งแรงของลูกบอลเกลียว	20
2.3.8.2 การจัดเรียงตัวของลูกบอลเกลียว	20
2.3.8.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต	20
2.3.8.4 ความหนืดของโพลีโพรพิลีนเหลว	21
2.3.8.5 ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม	21
2.4 สมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีน.....	22
2.4.1 พฤติกรรมทางกลในการรับแรงอัดของโพลีโพรพิลีน	22
2.4.1.1 โพลีโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบปิด	26
2.4.1.2 โพลีโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบเปิด.....	27
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีน.....	28
2.4.2.1 ชนิดของวัสดุเนื้อพื้น	28
2.4.2.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพลีโพรพิลีน	28
2.4.2.3 ขนาดของรูพรุน	29
2.4.2.4 รูปร่างของรูพรุน	30
2.4.2.5 การกระจายตัวของรูพรุน	31
2.4.2.6 ทิศทางของรูพรุน	31

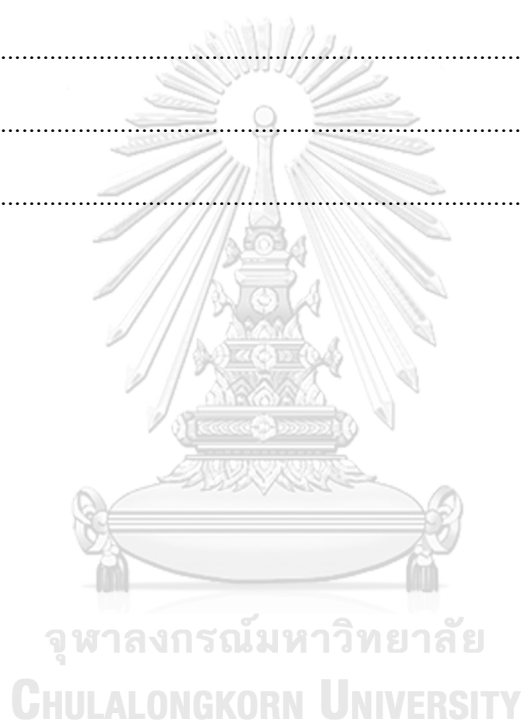
2.4.2.7 อัตราความเครียด.....	31
2.4.2.8 คำนิยามของโพลีโหม 32	32
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	33
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	34
3.3.1 การเตรียมลูกบอลเกล็ดสำหรับใช้เป็นตัวสร้างรูป.....	34
3.3.2 การขึ้นรูปโพลีโหม.....	37
3.3.2.1 การขึ้นรูปโพลีโหมโดยการอัดขึ้นรูป.....	37
3.3.2.2 การขึ้นรูปโพลีโหมโดยการหล่อขึ้นรูป	38
3.4 การคำนวณค่าต่างๆที่สัมพันธ์กับการผลิตโพลีโหมโดยใช้เกล็ดเป็นตัวสร้างรูป.....	40
3.4.1 ความหนาแน่นของโพลีโหม.....	40
3.4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพลีโหม.....	40
3.4.3 ปริมาณความพรุนของโพลีโหม.....	41
3.5 การตรวจสอบโครงสร้าง	41
3.5.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้าง.....	41
3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	41
3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
3.6 ทดสอบการรับแรงอัด	41
3.6.1 ลูกบอลเกล็ด	41
3.6.2 โพลีโหม.....	42
3.6.3 ความแข็งแรงความแข็งแรงจุดคราก.....	42
3.6.3.1 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน	42
3.7 สมบัติด้านการละลายน้ำของลูกบอลเกล็ด	43

3.8 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของลูกบอลเกลือ	43
3.9 สมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือ.....	43
3.10 โครงสร้างภายในของโพลีอะลูมิเนียม	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
4.1 สมบัติทางกายภาพของเกลือ	44
4.1.1 ขนาดของอนุภาคเกลือ.....	44
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของเกลือ.....	45
4.2 สมบัติของลูกบอลเกลือ.....	46
4.2.1 ลักษณะของลูกบอลเกลือที่ขึ้นรูปแล้วก่อนและหลังเผา	46
4.2.2 ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือ.....	46
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของลูกบอลเกลือ	47
4.2.4 ความสามารถในการละลายน้ำของลูกบอลเกลือ.....	48
4.2.5 ความแข็งแรงของลูกบอลเกลือ.....	49
4.2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวล เมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป.....	51
4.3 โครงสร้างของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียม	53
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อพื้นโพลีอะลูมิเนียม	53
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของรูพรุนโพลีอะลูมิเนียม.....	54
4.3.3 โครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมภายนอกหลังทำการแทรกซึม	55
4.3.4 โครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมภายในหลังการหล่อ	59
4.3.5 ผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลาต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	61
4.3.6 การทดสอบโครงสร้างภายในด้วยไมโครซีที	62
4.3.6.1 ชิ้นงานที่หลอมที่อุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที	62
4.3.6.2 ชิ้นงานโพลีที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 2 bar เวลา 10 นาที.....	63

4.3.6.3	ชิ้นงานโคมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C แรงดัน 1 bar เวลา 30 นาที.....	64
4.4	สมบัติทางกลของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียม	65
4.4.1	การทดสอบการรับแรงอัดของโคมอะลูมิเนียม	65
4.4.1.1	พฤติกรรมของการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่างกัน.....	65
4.4.1.2	พฤติกรรมของการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ผลิตด้วยแรงดันต่างกัน	66
4.4.1.3	พฤติกรรมของการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ผลิตด้วยระยะเวลาหลอมต่างกัน	67
4.4.2	การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากและการดูดซับพลังงานของโคมอะลูมิเนียม ...	69
4.4.2.1	การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดคราก	70
4.4.2.2	การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงาน.....	72
บทที่ 5	วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	76
5.1	ผลของสมบัติทางกายภาพของเกลือ	76
5.1.1	ผลของขนาดอนุภาคเกลือ	76
5.1.2	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเกลือ	76
5.2	สมบัติของลูกบอลเกลือ.....	77
5.2.1	ลักษณะของลูกบอลเกลือที่ขึ้นรูปแล้วก่อนและหลังเผา	77
5.2.2	ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือ.....	77
5.2.3	โครงสร้างจุลภาคบนผิวของลูกบอลเกลือ	77
5.2.4	ความสามารถในการละลายน้ำของลูกบอลเกลือ.....	78
5.2.5	ความแข็งแรงของลูกบอลเกลือ.....	78
5.2.6	การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวล เมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป.....	79
5.3	โครงสร้างของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียม	79
5.3.1	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อพื้นโคมอะลูมิเนียม	79
5.3.2	โครงสร้างจุลภาคของรูพรุนโคมอะลูมิเนียม.....	80

5.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม	80
5.3.4 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมภายในหลังการหล่อ	81
5.3.5 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม	81
5.3.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม	81
5.3.5.2 ผลของความดันต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม.....	82
5.3.5.3 ผลของเวลาต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม	83
5.3.6 การทดสอบโครงสร้างภายในด้วยไมโครซีที	85
5.4 สมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม	85
5.4.1 การทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม.....	85
5.4.1.1 ผลของอุณหภูมิในการหลอมต่อพฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม	86
5.4.1.2 ผลของความดันในการหลอมต่อพฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม	87
5.4.1.3 ผลของเวลาในการหลอมต่อพฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม	87
5.4.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดคราก.....	87
5.4.2.1 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่างกัน	87
5.4.2.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยแรงดันต่างกัน.....	88
5.4.2.3 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยระยะเวลาหลอมต่างกัน.....	88
5.4.3 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงาน	89
5.4.3.1 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่างกัน.....	89

5.4.3.2 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยด้วย	
ความดันต่างกัน	89
5.4.3.3 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยด้วย	
ความดันต่างกัน	90
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	91
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	91
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
บรรณานุกรม.....	94
บรรณานุกรม.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	98



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวและขนาดอนุภาคของเกลือก่อนและหลังบดลดขนาด	44
ตารางที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเกลือก่อนขึ้นรูป	45
ตารางที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวของลูกบอลเกลือก่อน	48
ตารางที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปและหล่อขึ้นรูป	53
ตารางที่ 4.5 ส่วนผสมของโพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC 12	54
ตารางที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรูพรุนชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปและหล่อขึ้นรูป	55
ตารางที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโพลีเอทิลีนหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที. 56	
ตารางที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโพลีเอทิลีนหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที. 58	
ตารางที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคภายในของโพลีเอทิลีนหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที.....	59
ตารางที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคภายในของโพลีเอทิลีนหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที.....	60
ตารางที่ 4.11 แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโพลีเอทิลีน	61
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงในรูปแบบความแข็งแรงจุดคราก และการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโพลีเอทิลีน	69
ตารางที่ 5.1 แสดงการส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน	84
ตารางที่ 5.2 แสดงการส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน	88
ตารางที่ 5.3 แสดงการส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน	90

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 (a) โครงสร้างรูพรุนแบบปิด (b) โครงสร้างรูพรุนแบบเปิด [3].....	5
รูปที่ 2.2 โฟมอะลูมิเนียมใช้เป็นโครงสร้างรถยนต์ไฟฟ้า (b) โฟมไทเทเนียมใช้เป็นอุปกรณ์รักษาฟัน [4]	6
รูปที่ 2.3 วัสดุที่มีโฟมอะลูมิเนียมอยู่ภายในโครงสร้าง.....	7
รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะที่สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มย่อย	7
รูปที่ 2.5 (ซ้าย) การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะโดยตรง (ขวา) ตัวอย่างชิ้นงานโฟมโลหะที่ได้จากการผลิต	9
รูปที่ 2.6 การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สจากสารปล่อยแก๊สในน้ำโลหะ	10
รูปที่ 2.7 (a) เครื่องมือสำหรับกรรมวิธี GASARs (b) ลักษณะโครงสร้างรูพรุนที่ผลิตด้วยกรรมวิธี GASARs	11
รูปที่ 2.8 (a) ขั้นตอนการผลิตโลหะด้วยวิธีทรงกลมกลวง (b) โฟมโลหะที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีทรงกลมกลวง	12
รูปที่ 2.9 (a) กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะโดยใช้วิธี Electro-deposition (b) โครงสร้างโฟม निकเกิลที่ผลิตจากการขึ้นรูปโฟมโลหะโดยใช้วิธี Electro-deposition	13
รูปที่ 2.10 (a),(b),(c) การผลิตโฟมโลหะด้วยวิธี Incofoam (d) ตัวอย่างชิ้นงานโฟมโลหะที่ได้จากการผลิตด้วยวิธี Incofoam	14
รูปที่ 2.11 (a) ตัวอย่างลูกบอลเกลื่อนขนาดต่างๆสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุน (b) โครงสร้างจุลภาคของลูกบอลเกลื่อน.....	16
รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการผลิตลูกบอลเกลื่อนด้วยวิธีการหยดลงบนพื้นเซรามิก [12]	17
รูปที่ 2.13 ลูกบอลเกลื่อนที่ได้จากการทำให้หยดเกลื่อนแข็งตัวในอากาศขนาด 0.50, 0.69, และ 0.95 mm ตามลำดับจากซ้ายไปขวา.....	17
รูปที่ 2.14 ลูกบอลเกลื่อนที่ได้จากการทำให้หยดเกลื่อนแข็งตัวในอากาศขนาด 0.50, 0.69, และ 0.95 mm ตามลำดับจากซ้าย	18

รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของโพลีเอทิลีนที่ใช้เส้นขนาด 0.5 mm เป็นตัวสร้างรูป (a) โครงสร้างรูปโดยรวมของชิ้นงาน b) โครงสร้างระหว่างรูปขนาดเล็กของชิ้นงาน	18
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการผลิตโพลีเอทิลีนที่ใช้ลูกบอลเกลียวสร้างรูป	19
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่ได้จากการผลิตโพลีเอทิลีนที่ใช้ลูกบอลเกลียวสร้างรูป [13].	20
รูปที่ 2.18 แสดงพฤติกรรมในการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีนในอุดมคติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง [9]	22
รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบพฤติกรรมในการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนน้ำ	24
รูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นว่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น	25
รูปที่ 2.21 พฤติกรรมในการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีนที่มีโครงสร้างแบบปิดที่มีความหนาแน่น 0.16 g/cm ³ [17]	26
รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่รวมทั้งแบบโครงสร้างแบบปิดและแบบโครงสร้างแบบเปิด [20]	27
รูปที่ 2.23 โครงสร้างรูปของโพลีเอทิลีนผสมชนิด H (0.228 g/cm ³) A (0.455 g/cm ³) B (0.250g/cm ³) และ C (0.301 g/cm ³) [6]	28
รูปที่ 2.24 พฤติกรรมในการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีนผสมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างกัน [6]..	29
รูปที่ 2.25 พฤติกรรมในการรับแรงกระทำที่ต่างกันของโพลีเอทิลีนที่มีรูปขนาดต่างกัน และการกระจายตัวต่างกัน [6]	30
รูปที่ 2.26 โพลีเอทิลีนที่มีรูปร่างของรูปต่างๆ a) รูปรูปร่างไม่แน่นอน b) รูปรูปร่างทรงกลม c) รูปรูปที่เกิดจากช่องว่างระหว่างรูปร่างทรงกลม [14]	31
รูปที่ 2.27 โครงสร้างจุลภาคของโพลีเอทิลีนที่มีตำหนิ a) ตำหนิที่ขอบรูปและรูปขนาดเล็กภายในโครงสร้างของโพลีเอทิลีน b) รูปภายในโครงสร้างโพลีเอทิลีนแบบ Cross-section [21]	32
รูปที่ 3.1 เครื่องควบคุมขนาดลูกบอลเกลียว	35
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตลูกบอลเกลียวรูปทรงกลม	36
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการผลิตโพลีเอทิลีนด้วยการอัดขึ้นรูป	37
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผลิตโพลีเอทิลีนโดยการหล่อขึ้นรูป	39

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบของลูกบอลเกลือ 3 ขนาด ได้แก่ 5, 10 และ 15 mm (A) ระหว่างก่อนเผา ผนึก และ (B) หลังเผาผนึก.....	46
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือก่อนเผาผนึกและหลังเผาผนึก.....	47
รูปที่ 4.3 ความสามารถในการละลายน้ำของลูกบอลเกลือทั้งสามขนาด.....	49
รูปที่ 4.4 แสดงความสามารถในการรับแรงอัดของลูกบอลเกลือก่อนเผาผนึกและหลังเผาผนึกทั้ง 3 ขนาด a) 5 mm b) 10 mm และ c) 15 mm.....	50
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลง มวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป	51
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือที่เผาผนึกแล้วและอะลูมิเนียม ด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป	52
รูปที่ 4.7 การตรวจสอบองค์ประกอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยปฏิสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดรังสี เอกซ์ (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy).....	54
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที	62
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 2 bar เวลา 10 นาที	63
รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C แรงดัน 1 bar เวลา 30 นาที.....	64
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดที่ได้รับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วย อุณหภูมิต่างกัน a) อุณหภูมิ 650 และ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที b) อุณหภูมิ 650 และ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที c) อุณหภูมิ 650 และ 700 °C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที d) อุณหภูมิ 650 และ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที	66
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดที่ได้รับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วย เวลาต่างกัน a) อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที b) อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที c) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที d) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที.....	67

รูปที่ 4.13 รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดที่ได้รับแรงอัดของชิ้นงานโพลีเอทิลีน ที่ผลิตด้วยเวลาต่างกัน a) อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที b) อุณหภูมิ 650°C ความ ดัน 1 bar เวลา 30 นาที c) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที d) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที	68
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงจุดครากเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการ ผลิตต่างกัน.....	70
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงจุดครากเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการ ผลิตต่างกัน.....	71
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงจุดครากของยังเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้เวลาใน การผลิตต่างกัน	72
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการ ผลิตต่างกัน.....	73
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการ ผลิตต่างกัน.....	74
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการ ผลิตต่างกัน.....	75
รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 10 และ 30 นาที ความดัน 1 และ 2 bar โดยใช้อุณหภูมิ 700 °C	82
รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่หลอมด้วยแรงดัน 1 และ 2 bar	83
รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 10 และ 30 นาที	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

โฟมโลหะเป็นวัสดุน้ำหนักเบาที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากโครงสร้างของวัสดุธรรมชาติ เช่น ไม้ กระดุก ฟองน้ำ เป็นต้น นักวิจัยจำนวนมากสนใจและพัฒนาโฟมโลหะมาเป็นเวลานาน ไม่ว่าจะเป็นในเรื่อง รูปร่างและขนาดของรูพรุนภายในโครงสร้างโฟม วิธีการสร้างรูพรุนหรือการ กระจายตัวของรูพรุน เป็นต้น นอกจากนี้วิศวกรในภาคอุตสาหกรรมได้พัฒนาการผลิตโฟมโลหะให้ดีขึ้นเรื่อย ๆ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องขนาดหรือกำลังการผลิต คุณภาพของโฟมโลหะ แม้กระทั่งความคุ้มค่าของราคาและต้นทุนในการผลิต ซึ่งรูปแบบวิธีการผลิตจะส่งผลถึงลักษณะโครงสร้างของโฟมโลหะด้วย เช่น โฟมโลหะที่มีโครงสร้างภายในแบบปิดและแบบเปิด ซึ่งโฟมโลหะแต่ละชนิดจะเหมาะสมกับการใช้งานแตกต่างกัน เช่นโฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบเปิดเหมาะกับการใช้งานในระบบที่มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากระบายความร้อนได้ดี โฟมที่มีโครงสร้างแบบปิดเหมาะกับการใช้งานรับแรงดัดในขณะเดียวกันก็ต้องการน้ำหนักโครงสร้างที่เบา เป็นต้น

อะลูมิเนียมถูกนำมาใช้ผลิตเป็นโฟมโลหะอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งช่วยส่งเสริมให้โฟมมีจุดเด่นด้านน้ำหนักเบามากขึ้น อีกทั้งยังสามารถผลิตเป็นโฟมได้หลายรูปแบบเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวไม่สูงมาก จุดเด่นด้านการใช้งานคือเป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา โครงสร้างที่สามารถรับแรงปะทะได้ดี อีกทั้งยังเป็นฉนวนกันความร้อนและฉนวนกันเสียงที่ดีอีกด้วย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษากระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดด้วยการใช้ลูกบอลเกลือเป็นตัวสร้างรูพรุน เนื่องจากสามารถผลิตได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตอื่น ๆ นอกจากนี้ลูกบอลเกลือที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุนยังสามารถผลิตให้มีขนาดและรูปร่างตามต้องการได้ไม่ยาก ทำให้ง่ายต่อการกำหนดรูปร่าง ขนาด และรูปแบบการกระจายตัวของรูพรุนภายในโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมที่มีรูพรุนแตกต่างกันต่อการรับแรงอัดไม่ว่าจะเป็นความเค้น ความแข็งแรงจุดคราก หรือการดูดซับพลังงานก็ตาม นอกจากนี้ยังศึกษาถึงสมบัติต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อโครงสร้างโฟมเช่น ความหนาแน่น การเชื่อมต่อของรูพรุนภายในโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิวของรูพรุนที่เคยสัมผัสกับลูกบอล

เกลือมาก่อน การใช้เกลือเป็นตัวสร้างรูพรุนนั้น นอกจากประหยัดและหาได้ง่ายแล้วยังสามารถกำจัดออกในภายหลังให้เหลือเพียงโครงสร้างโพลีอะลูมิเนียมได้ง่ายโดยการละลายน้ำ โดยที่ไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อผู้ทำวิจัยและระบบนิเวศอีกด้วย

ปัญหาทั่วไปของการผลิตโพลีอะลูมิเนียมโดยการใช้ลูกบอลเกลือในการสร้างรูพรุนคือการควบคุมการผลิตลูกบอลเกลือให้มีคุณภาพตามต้องการ เช่น ขนาด รูปร่าง และจำนวนที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ ในงานวิจัยอื่นๆ ได้ศึกษาสมบัติของโพลีอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดโดยใช้เกลือเป็นตัวสร้างรูพรุน แต่ไม่ได้ให้ความสำคัญกับการควบคุมขนาดและรูปร่างที่แน่นอน อีกทั้งไม่ได้ศึกษาปัจจัยการผลิตที่อาจส่งผลถึงโครงสร้างและสมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียม เช่น อุณหภูมิ ความดันแก๊ส และระยะเวลาในการหลอม เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียมโดยการควบคุมขนาดและรูปร่างของรูพรุนจากการใช้ลูกบอลเกลือ อีกทั้งยังศึกษาและเปรียบเทียบผลของการใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาหลอม และความดันที่แตกต่างกันในการผลิตโพลีอะลูมิเนียม ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานและสมบัติทางกล

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาและผลิตลูกบอลเกลือสำหรับสร้างรูพรุนของโพลีอะลูมิเนียม และตรวจสอบลักษณะและสมบัติทางกลของลูกบอลเกลือ
- เพื่อผลิตโพลีอะลูมิเนียมจากการใช้ลูกบอลเกลือที่เป็นตัวสร้างรูพรุนด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป
- เพื่อศึกษาผลของการใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาหลอม และความดันที่แตกต่างกัน ต่อลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกลของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยการหล่อขึ้นรูป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- ผลิตลูกบอลเกลือที่มีรูปร่างทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 10 และ 15 mm
- ผลิตโพลีอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดด้วยกรรมวิธีการสร้างรูพรุนจากลูกบอลเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm
- ผลิตโพลีอะลูมิเนียมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปและเผาในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 650 °C

- ผลิตภัณฑ์โพลีเอไมด์ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปและเผาในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 650 และ 750 °C เวลา 10 และ 30 นาที ที่ความดัน 1 และ 2 bar

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เรียนรู้วิธีการผลิตลูกบอลเกลียวสำหรับผลิตภัณฑ์โพลีเอไมด์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด
- เรียนรู้และเข้าใจถึงวิธีการผลิตโพลีเอไมด์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดด้วยกรรมวิธีการสร้างรูพรุนจากลูกบอลเกลียว
- เรียนรู้สมบัติและลักษณะของโพลีเอไมด์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดที่ผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปและการหล่อขึ้นรูป
- เรียนรู้ความแตกต่างของสมบัติและลักษณะของโพลีเอไมด์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดที่ผลิตจากกระบวนการหล่อขึ้นรูปที่ใช้อุณหภูมิ เวลา และ ความดันต่างกัน
- ได้รับประสบการณ์การออกแบบวิธีการวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงการประยุกต์ใช้ใช้เครื่องมือทางด้านวิศวกรรมต่างๆในงานวิจัย

บทที่ 2

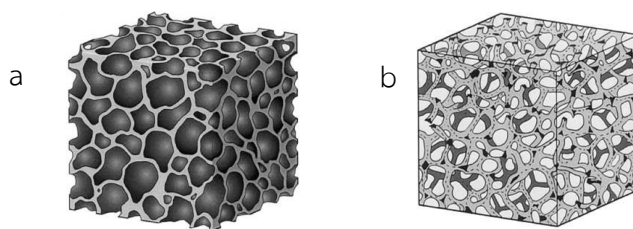
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะ (Metal foams) คือ วัสดุโลหะที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนจำนวนมาก โดยทั่วไปโฟมโลหะมีรูพรุนสูงถึง 75 - 95% [1] ทำให้มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั่วไปที่มีพื้นฐานจากโลหะชนิดเดียวกัน วัสดุที่นิยมใช้สำหรับเป็นเนื้อพื้นของโฟมโลหะ เช่น อะลูมิเนียม นิกเกิล ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว ดีบุก แมกนีเซียม และเหล็กกล้าไร้สนิม สมบัติทางกลโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ เนื้อพื้นและความหนาแน่น ซึ่งสมบัติเด่นของโฟมโลหะได้แก่ การนำความร้อนต่ำ (Low thermal conductivity) ความต้านทานการรับแรงอัดสูง (High compression strengths) และการดูดซับพลังงานจากการกระแทกดี (Good energy absorption) ความแข็งตึงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (High stiffness to weight ratio) เป็นต้น [1]

2.1.1 ประเภทและลักษณะของโฟมโลหะ

โฟมโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ โฟมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบปิด (Closed-cell foam) ภายในโครงสร้างจะมีลักษณะคล้ายเยื่อหุ้มปิดคลุมรูพรุนทั้งหมด รูพรุนถูกปิดผนึกไม่เชื่อมถึงกัน [1] ทำให้ของไหลไม่สามารถไหลผ่านได้ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) และโฟมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด (Open-cell foam) ภายในโครงสร้างมีลักษณะคล้ายร่างแหต่อกันระหว่างรูพรุน รูพรุนเชื่อมต่อกัน ทำให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้ [1] ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 (b)



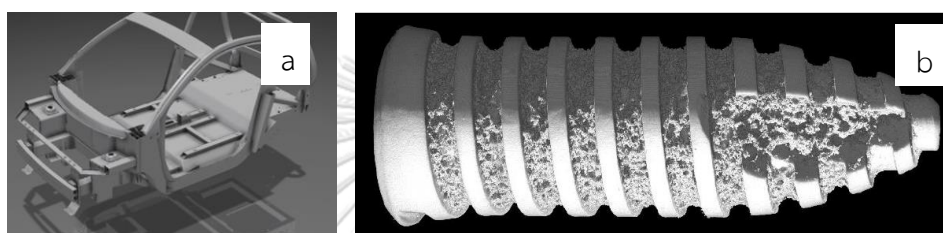
รูปที่ 2.1 (a) โครงสร้างรูพรุนแบบปิด (b) โครงสร้างรูพรุนแบบเปิด [3]

2.1.2 การใช้งานโฟมโลหะ

เนื่องจากสมบัติเด่นของโฟมโลหะเรื่องความสามารถในการรับแรงกระแทกหรือแรงอัดสูง แต่มีน้ำหนักเบา จึงมีการนำโฟมโลหะไปใช้งานอย่างแพร่หลาย การเลือกใช้งานโฟมโลหะขึ้นอยู่กับประเภทของโครงสร้างรูพรุนเป็นหลัก โดยส่วนใหญ่โฟมโลหะที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบปิดจะถูกนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมที่ต้องรับแรงกระทำ เนื่องจากสมบัติด้านความหนาแน่นต่ำและความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ในขณะที่โฟมโลหะที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดมีสมบัติทางกลต่ำกว่าโครงสร้างรูพรุนแบบปิด จึงถูกใช้ประโยชน์จากความสามารถในการยอมให้ของไหลผ่านได้ และสมบัติการนำความร้อนต่ำ [1] ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานโฟมโลหะ ได้แก่

- ใช้เป็นโครงสร้างสำหรับแกนยึดปีกเครื่องบินและโครงสร้างของรถยนต์ เนื่องจากโฟมโลหะมีน้ำหนักเบาและระบายความร้อนได้ดี ในขณะที่ยังคงความแข็งแรง [2] [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a)
- ใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องฟอกไอเสีย (Catalytic converter) เนื่องจากโฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบเปิดมีสมบัติในการยอมให้อากาศไหลผ่านได้ดี อีกทั้งมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะการที่ทำให้อัตราการไหลผ่านของอากาศสูงขึ้นจะช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของเครื่องฟอกไอเสียให้ดีขึ้น
- ใช้เป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) เช่น วัสดุปลูกถ่ายเซลล์กระดูก วัสดุซ่อมแซมกระดูกและฟันโดยการใช้โฟมไทเทเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (b)

- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน (Heat insulation) เนื่องจากโฟมโลหะมีสมบัติการนำความร้อนต่ำ ทำให้สามารถทนทานต่อความร้อนได้ดี อีกทั้งมีน้ำหนักเบาทำให้เหมาะกับสภาพแวดล้อมที่รับน้ำหนักได้น้อย
- ใช้เป็นฉนวนกันเสียง (Sound insulation) เนื่องจากมีสมบัติดูดซับเสียงได้ดี เมื่อรวมกับสมบัติการทนความร้อน จึงถูกนำไปใช้ในสภาวะที่มีการขัดสีและมีอุณหภูมิสูง [3]



รูปที่ 2.2 โฟมอะลูมิเนียมใช้เป็นโครงสร้างรถยนต์ไฟฟ้า (b) โฟมไทเทเนียมใช้เป็นอุปกรณ์รักษาพัน [4]

2.2 โฟมอะลูมิเนียม

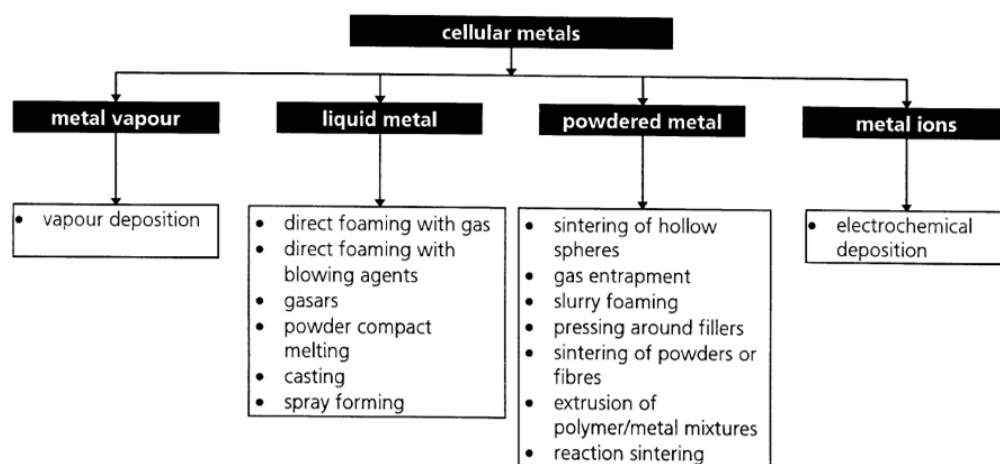
โฟมอะลูมิเนียม (Aluminium foam) คือโฟมที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโฟม โดยโฟมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความพรุนสูง ประกอบด้วยรูพรุนที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม สมบัติเด่นของโฟมอะลูมิเนียมคือน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง ในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดที่ดี ทนอุณหภูมิสูงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ (Polymeric foam) ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง จึงมีการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียง นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุสำหรับตกแต่งใช้งานในด้านสถาปัตยกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.3 และสามารถประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ โดยการควบคุมขนาดและรูปร่างรูพรุนภายในโฟมอะลูมิเนียมทำให้ได้สมบัติทางกลที่ต้องการ



รูปที่ 2.3 วัสดุที่มีโฟมอะลูมิเนียมอยู่ภายในโครงสร้าง

2.3 การผลิตโฟมโลหะ

การผลิตโฟมโลหะถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานานกว่า 20 ปี ในช่วงแรกของการพัฒนาโฟมโลหะจะนิยมผลิตด้วยผงโลหะเป็นหลัก [5] และความพรุนของโฟมโลหะเพียง 30% ปัจจุบันการผลิตโฟมโลหะถูกพัฒนาจนสามารถผลิตโฟมโลหะที่มีความพรุนถึง 98% [5] นอกจากนี้การสร้างรูพรุนในโครงสร้างโฟมโลหะก็มีหลากหลายวิธีมากขึ้น สามารถแบ่งกระบวนการผลิตตามสถานะโลหะสารตั้งต้นออกได้เป็น 4 วิธีหลักดังแสดงในรูปที่ 2.4



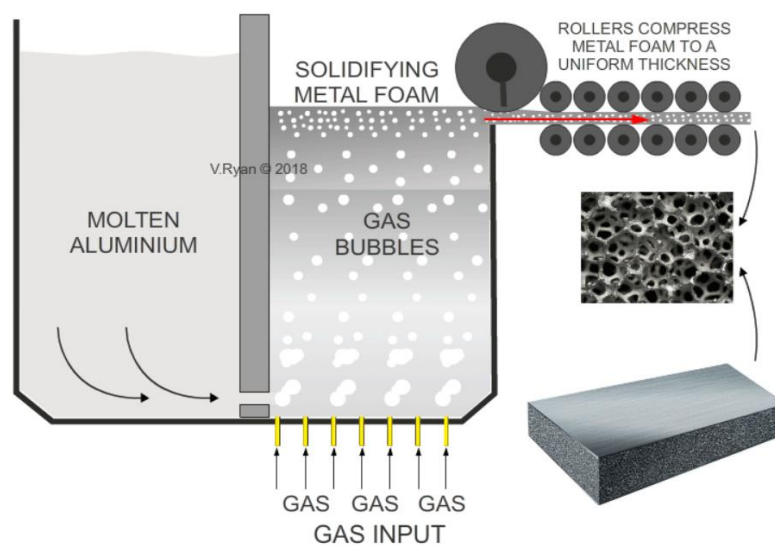
รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะที่สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มย่อย

2.3.1 กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะด้วยน้ำโลหะ

การผลิตโฟมโลหะด้วยโลหะเหลวแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ วิธีแบบปล่อยแก๊สโดยตรง (Direct foaming by gas injection) และวิธีแบบเติมสารปล่อยแก๊ส (Foaming with foaming agent) ในน้ำโลหะ

2.3.1.1 การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะโดยตรง

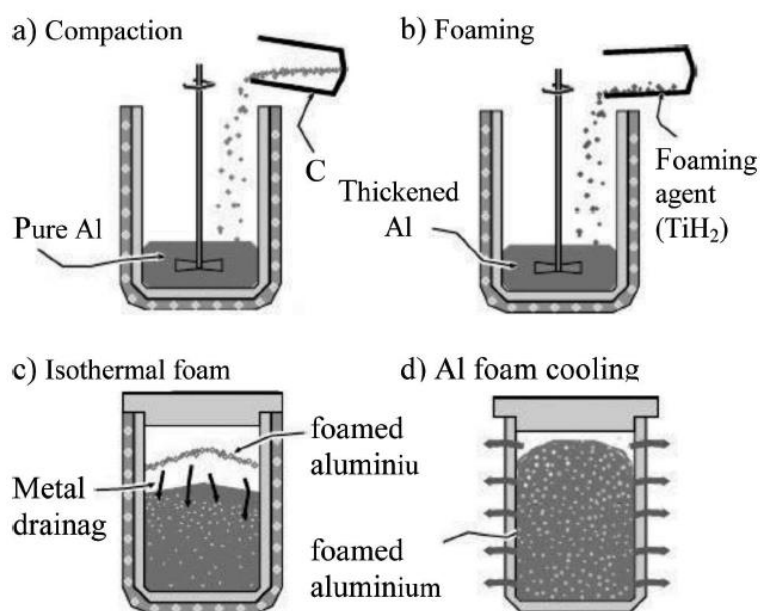
การทำให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างโฟมโลหะสามารถทำได้โดยตรงจากการสร้างฟองอากาศภายในโลหะหลอมเหลว โดยปกติแล้วฟองอากาศมักลอยขึ้นสู่ผิวของโลหะเหลวอย่างรวดเร็ว สามารถแก้ไขได้โดยการเติมผงเซรามิกขนาดเล็ก เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อะลูมินา (Al_2O_3) หรือไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) เป็นต้น หรือสารประกอบที่ช่วยรักษาความเสถียรในโลหะเหลว ทำให้การลอยขึ้นของฟองแก๊สถูกขัดขวางโดยความหนืดของโลหะเหลวที่เพิ่มขึ้น โฟมโลหะส่วนใหญ่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้โดยเฉพาะ โฟมอะลูมิเนียม โฟมแมกนีเซียม โฟมสังกะสี และโฟมโลหะผสมที่มีพื้นฐานเป็นโลหะเหล่านี้ [5] การผลิตโฟมโลหะโดยวิธีนี้เป็นวิธีการผลิตแบบต่อเนื่อง จึงสามารถผลิตโฟมขนาดใหญ่ที่มีความยาวตามต้องการได้ ปัจจัยหลักในการผลิตที่ส่งผลต่อโครงสร้างโฟมโลหะที่ผลิตด้วยวิธีนี้ คือ อุณหภูมิในเตา ความหนืดของน้ำโลหะ ประเภทของแก๊สที่ใช้ อัตราการเป่าแก๊ส รูปร่างใบพัด และความเร็รรอบของใบพัด เป็นต้น [6]



รูปที่ 2.5 (ซ้าย) การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะโดยตรง (ขวา) ตัวอย่างชิ้นงานโฟมโลหะที่ได้จากการผลิต

2.3.1.2 การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สจากสารปล่อยแก๊สในน้ำโลหะ

การทำให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างโฟมโลหะด้วยการทำให้เกิดแก๊สขึ้นภายในโลหะเหลวโดยการเติมสารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) เข้าไปภายในโลหะเหลว โดยทั่วไปนิยมใช้สารประกอบกลุ่มไฮไดรด์ เช่น ไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (ZrH_2) หรือ แมกนีเซียมไฮไดรด์ (MgH_2) เป็นต้น นอกจากนี้อาจใช้ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในกรณีนี้ แก๊สที่ได้จากการสลายตัวจะเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) การผลิตเริ่มต้นจากการเติมธาตุผสม (Alloying agent) เพื่อเพิ่มความเหนียว จากนั้นปล่อยแก๊สเข้าไปในระบบแล้วผสมให้อุณหภูมิของสารที่เติมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำโลหะ โดยมีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตคือเวลาในการลดอุณหภูมิของน้ำโลหะจากสถานะหลอมเหลวจนถึงแข็งตัวต้องเร็วพอที่แก๊สจะไม่ลอยออกไปจนหมด [3]



รูปที่ 2.6 การผลิตโฟมโลหะโดยการปล่อยแก๊สจากสารปล่อยแก๊สในน้ำโลหะ

2.3.2 กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะด้วยผงโลหะ

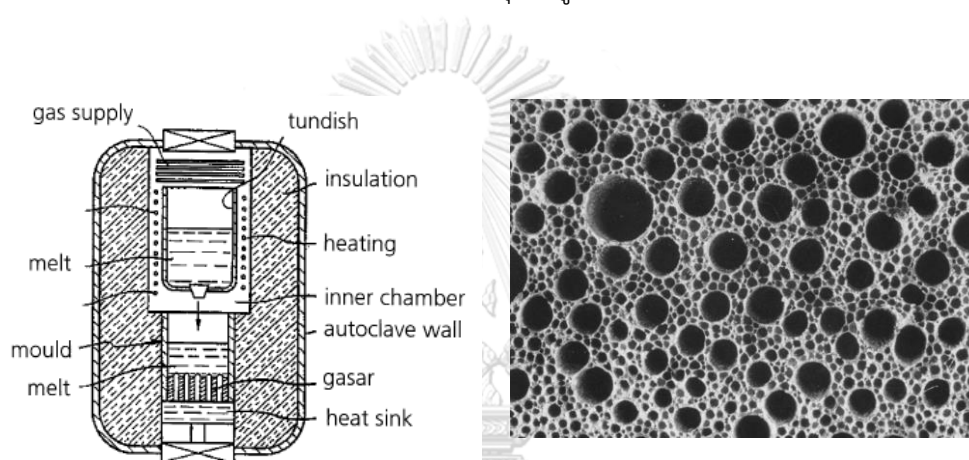
การผลิตโฟมโลหะจากผงโลหะเป็นวิธีที่นิยมและถูกพัฒนา คิดค้น หลากหลายวิธี ซึ่งตัวอย่างการผลิตมีดังนี้

— การใช้สารปล่อยแก๊สในชิ้นงานอัดขึ้นรูป

เป็นวิธีการผลิตโฟมโลหะโดยการผสมผงโลหะกับสารปล่อยแก๊สจนเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะใช้ผงอะลูมิเนียมผสมกับอนุภาค TiH_2 ซึ่งสามารถก่อให้เกิดแก๊ส H_2 ได้ จากนั้นผงที่ผสมกันดีแล้วจะถูกนำไปอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน เรียกว่า “Precursor” ด้วยวิธีการอัดต่างๆ เช่น การอัดด้วยความดันแกนเดียว (Uniaxial pressing) การอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (Isostatic pressing) เป็นต้น จากนั้น Precursor จะถูกนำไปในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเตาเผา เมื่ออุณหภูมิถึงจุดหนึ่งที่ TiH_2 เกิดการสลายตัวและปล่อยแก๊สไฮโดรเจนออกมาภายใน Precursor ที่กำลังเริ่มหลอมเหลวทำให้เกิดการขยายตัวขึ้นจากแรงดันแก๊สภายใน จนได้โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิด

— การผลิตโฟมโลหะด้วยวิธี GASARs

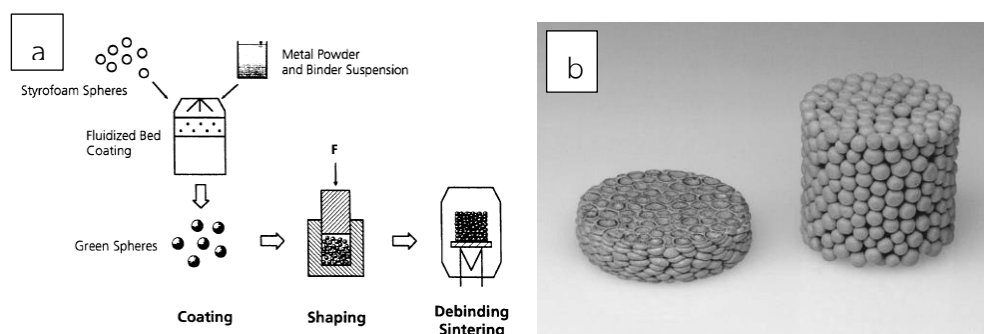
วิธีนี้ใช้ประโยชน์จากการที่โลหะบางชนิดเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งที่จุดยูเทคติกพร้อมกันกับแก๊สไฮโดรเจนในแผนภูมิของเฟส (*Phase Diagram*) โดยการหลอมโลหะภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนและแรงดันสูง ดังรูปที่ 2.7 เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาถึงจุดยูเทคติก จะเกิดการเปลี่ยนสถานะของโลหะเป็นของแข็งซึ่งในขณะนั้นปฏิกิริยาเกิดที่ความดันสูงทำให้แก๊สไฮโดรเจนที่มีอยู่แล้วในระบบแพร่เข้าไปในโลหะเหลวจนกระทั่งอุณหภูมิลดต่ำลงเกิดเป็นโลหะโฟม[2] [7]



รูปที่ 2.7 (a) เครื่องมือสำหรับกรรมวิธี GASARs (b) ลักษณะโครงสร้างรูพรุนที่ผลิตด้วยกรรมวิธี GASARs

— การผลิตโลหะด้วยวิธีทรงกลมกลวง

การผลิตโฟมโลหะด้วยวิธีทรงกลมกลวงเป็นการสร้างโลหะทรงกลมกลวงจากสารละลายชั้น (Slurry) ที่มีสารปล่อยแก๊สเช่น TiH_2 ผสมกับตัวยึดอินทรีย์ (Organic binder) และตัวทำสารละลาย (Solvent) เมื่อโลหะทรงกลมแข็งตัวจะถูกให้ความร้อนเพื่อกำจัดตัวทำละลายและตัวยึด และทำให้แก๊สออกมาจากโครงสร้างเกิดเป็นโลหะทรงกลมกลวงที่ยึดติดกันจำนวนมาก [5] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 (a) ขั้นตอนการผลิตโลหะด้วยวิธีทรงกลมกลวง (b) โฟมโลหะที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีทรงกลมกลวง

— การผลิตโฟมโลหะด้วยวิธีการขยายตัวของแก๊สที่ดักไว้

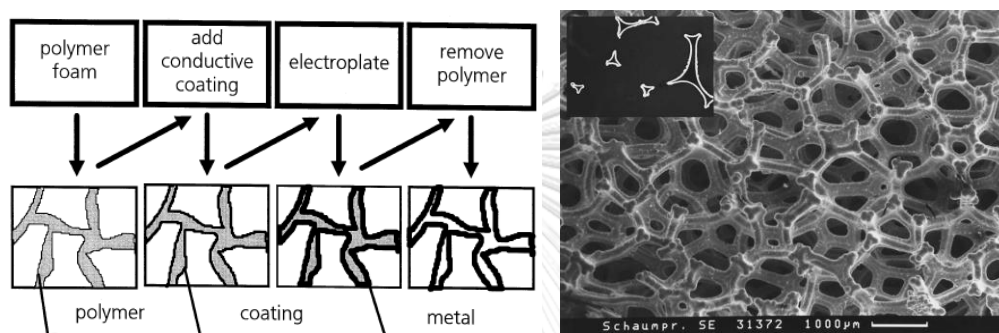
การผลิตโฟมโลหะวิธีนี้เริ่มต้นจากการที่ผงโลหะจะถูกอัดแน่นด้วยอาร์กอน เพื่อให้แก๊สอาร์กอนอยู่ภายในโครงสร้างโลหะ เมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน จะเกิดการขยายตัวเนื่องจากแรงดันของแก๊สอาร์กอนภายในโครงสร้างทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นลดลงและเกิดรูพรุนอยู่ภายใน วิธีนี้ถูกปรับใช้กับไทเทเนียมโฟมในอุตสาหกรรมการบิน โดยผงไทเทเนียมจะถูกเติมลงไปในการป้องกันที่กำจัดแก๊สออกซิเจนไปแล้ว จากนั้นเติมแก๊สอาร์กอนที่ความดัน 3 ถึง 5 บรรยากาศ เมื่อปิดผนึกกระป๋องแล้วนำไปอัดด้วยวิธี Hot isostatic pressing (HIP) เพื่อให้โครงสร้างหนาแน่นขึ้นทำให้แก๊สอาร์กอนถูกบีบอัดตามไปด้วย

2.3.3 กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะโดยใช้วิธี Electro-deposition

การผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไฟฟ้าเริ่มจากการเตรียมโลหะที่อยู่ในรูปไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นไอออนโลหะจะสะสมบนโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดที่ถูกเตรียมไว้สำหรับเป็นต้นแบบด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า เรียกว่า “Electro-deposition” โพลิเมอร์จะถูกจุ่มลงในสารละลายที่นำไฟฟ้าที่มีพื้นฐานเป็น แกรไฟต์ หรือคาร์บอนดำ ทำให้เกิดการเคลือบของสารเหล่านี้ลงบนผิวโพลิเมอร์โดยการจุ่มลงในสารละลายที่ปราศจากไฟฟ้าแต่อาศัย

กระบวนการทางเคมี (Electroless plating solution) หรืออาจทำการเคลือบผิวโพลิเมอร์ด้วย

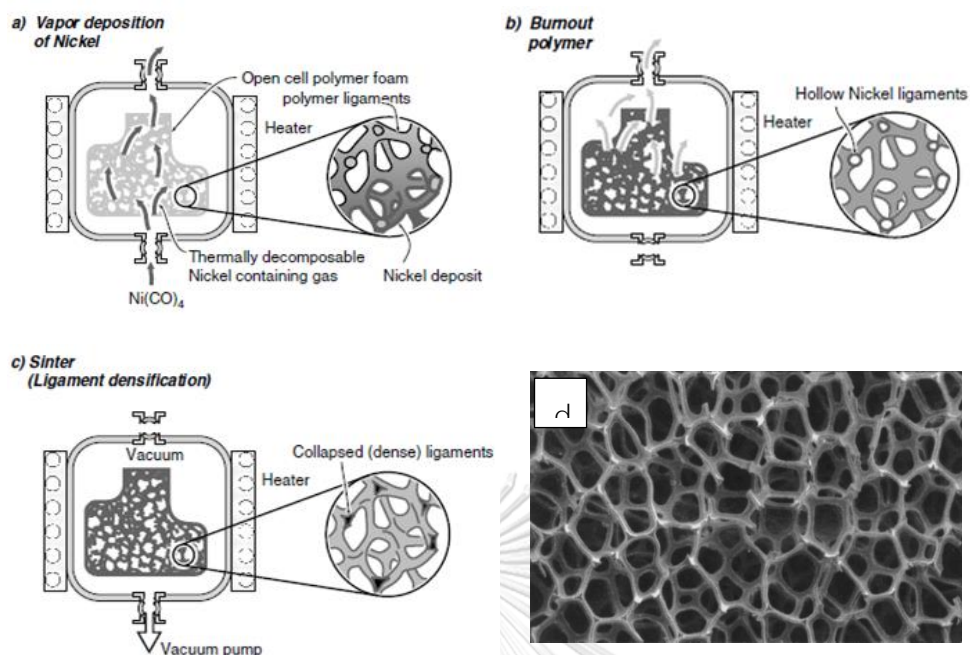
ชั้นเคลือบที่นำไฟฟ้าด้วยกรรมวิธีการฉาบด้วยโลหะแบบแคโทด (Cathode sputtering) [1] เมื่อได้โฟมโลหะที่มีขนาดหรือความหนาที่ต้องการโฟมพอลิเมอร์จะถูกกำจัดโดยกรรมวิธีทางความร้อนต่อไป ซึ่งโฟมโลหะที่ผลิตได้จะมีรูพรุนประมาณ 2.5 ถึง 30 โพรงต่อเซนติเมตร และมีขนาดแต่ละรูพรุนประมาณ 3.2 ถึง 0.5 mm ตัวอย่างโฟมโลหะที่นิยมผลิตด้วยวิธีนี้เช่น โฟมนิกเกิล โฟมโลหะผสมนิกเกิลโครเมียม หรือโฟมทองแดง เป็นต้น [5] [8]



รูปที่ 2.9 (a) กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะโดยใช้วิธี Electro-deposition (b) โครงสร้างโฟมnikเกิลที่ผลิตจากการขึ้นรูปโฟมโลหะโดยใช้วิธี Electro-deposition

2.3.4 กระบวนการขึ้นรูปโฟมโลหะด้วยไอโลหะ

โลหะหรือสารประกอบโลหะในสถานะแก๊สสามารถใช้ผลิตโฟมโลหะได้เช่นกัน โดยใช้โฟมพอลิเมอร์เป็นต้นแบบให้เกิดการสะสมตัวของไอโลหะ เรียกว่าวิธี Chemical vapor deposition (CVD) เช่นการผลิตโฟมnikเกิล ซึ่งมีขั้นตอนคือใช้โฟมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดเป็นต้นแบบ แล้วใช้แก๊สนิกเกิลคาร์บอนิล ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) เป็นแก๊สให้ไอระเหยnikเกิล โดยจะถูกให้ความร้อนจากเตาที่อุณหภูมิประมาณ 120°C ซึ่งเป็นการให้ความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรด เนื่องจากไม่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว เมื่อเกิดการสะสมของไอโลหะบนต้นแบบจนได้โครงสร้างโฟมnikเกิลตามขนาดหรือความหนาที่ต้องการแล้วจะลดอุณหภูมิลง เมื่อเย็นตัวพอลิเมอร์จะถูกกำจัดออกด้วยการใช้ความร้อนหรือใช้สารเคมีจนเหลือเพียงโครงสร้างโฟมnikเกิล ซึ่งวิธีการนี้ในเชิงพาณิชย์เรียกว่า “Incofoam” โฟมโลหะที่ได้จะมีความพรุนอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.6 g/cm^3 และมีnikเกิลที่ได้มีความบริสุทธิ์ถึง 99.97% [5] [9]



รูปที่ 2.10 (a),(b),(c) การผลิตโฟมโลหะด้วยวิธี Incofoam (d) ตัวอย่างชิ้นงานโฟมโลหะที่ได้จากการผลิตด้วยวิธี Incofoam

2.3.5 การผลิตโฟมโลหะโดยใช้ลูกบอลเกลือสร้างรูพรุน

โฟมโลหะบางชนิดผลิตจากการหล่อโลหะภายในแบบโดยมีวัสดุอินทรีย์หรืออนินทรีย์ชนิดอื่นซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นลูกบอลกลมจำนวนมากกระจายอยู่ภายในแบบ ซึ่งวัสดุเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างภายในที่ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นโพรงในภายหลัง เรียกว่า “Space holder” หรือตัวสร้างรูพรุน วัสดุเหล่านี้จะถูกกำจัดออกภายหลังโดยละลายในสารละลายบางชนิด เช่น น้ำ หรือสารละลายกรด อย่างไรก็ตามการจะทำให้เป็นโฟมโลหะที่สมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อวัสดุเหล่านี้มีการเชื่อมต่อกัน เพื่อให้สามารถกำจัดวัสดุเหล่านี้ออกไปได้ง่าย ทำให้ได้โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบเปิด ตัวอย่างวัสดุเช่น ลูกบอลดินเผา ลูกบอลเกลือ ลูกบอลทราย ลูกบอลแก้ว หรือลูกบอลอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

2.3.6 การใช้ NaCl เป็นตัวสร้างรูพรุน

เกลือเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวสร้างรูพรุนของโพลีโพรพิลีน โดยทั่วไปจะใช้เกลือที่มีอนุภาคขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร โดยเฉพาะในกระบวนการที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้น เนื่องจากเกลือเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวสูงพอโดยที่ไม่สลายไปในขณะที่อะลูมิเนียมกำลังหลอมเหลว อีกทั้งยังสามารถกำจัดออกได้ง่ายด้วยการละลายน้ำ อย่างไรก็ตามการใช้เกลือระดับไมโครเมตรมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของชิ้นงานและปริมาณรูพรุนที่มีช่วงไม่กว้างนัก อีกทั้งลักษณะรูปร่างของเกลือโดยทั่วไปจะมีขอบมุม (Angular shape) ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีนเรื่องความเข้มข้นความเค้น (Stress concentration) นอกจากนี้ยังต้องระวังเรื่องการกำจัดเกลือออกจากชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีโอกาสที่เกลือจะตกค้างอยู่ในชิ้นงานได้ ซึ่งมีผลให้สมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีนแยลงเนื่องจากอาจเกิดการกัดกร่อนกับเนื้ออะลูมิเนียมได้

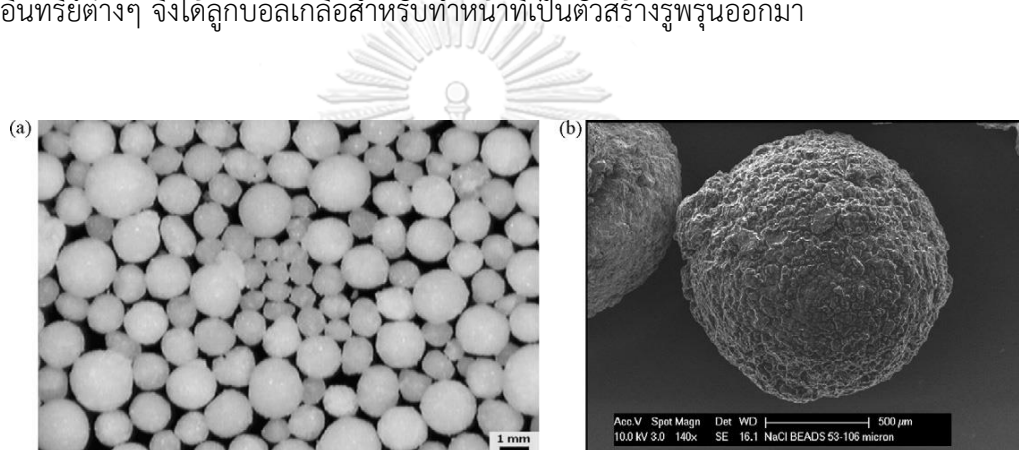
2.3.7 การใช้ NaCl เป็นตัวสร้างรูพรุน

เกลือเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวสร้างรูพรุนของโพลีโพรพิลีน โดยทั่วไปจะใช้เกลือที่มีอนุภาคขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร โดยเฉพาะในกระบวนการที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้น เนื่องจากเกลือเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวสูงพอโดยที่ไม่สลายไปในขณะที่อะลูมิเนียมกำลังหลอมเหลว อีกทั้งยังสามารถกำจัดออกได้ง่ายด้วยการละลายน้ำ อย่างไรก็ตามการใช้เกลือระดับไมโครเมตรมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของชิ้นงานและปริมาณรูพรุนที่มีช่วงไม่กว้างนัก อีกทั้งลักษณะรูปร่างของเกลือโดยทั่วไปจะมีขอบมุม (Angular shape) ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีนเรื่องความเข้มข้นความเค้น (Stress concentration) นอกจากนี้ยังต้องระวังเรื่องการกำจัดเกลือออกจากชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีโอกาสที่เกลือจะตกค้างอยู่ในชิ้นงานได้ ซึ่งมีผลให้สมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีนแยลงเนื่องจากอาจเกิดการกัดกร่อนกับเนื้ออะลูมิเนียมได้

2.3.7.1 การเตรียมลูกบอลเกลือ

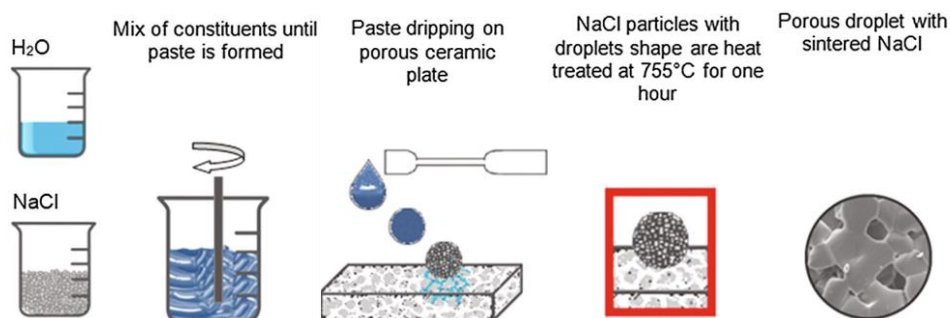
การสร้างลูกบอลเกลือสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุน มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของลูกบอลเกลือที่ต้องการ

- Jinnapat และคณะ [10] ได้นำเสนอการเตรียมลูกบอลเกลือสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุน โดยการเตรียมผงเกลือที่มีขนาดค่อนข้างละเอียดเพื่อสะดวกต่อการขึ้นรูปทรงกลม แล้วผสมเกลือ ตัวยึดอินทรีย์ เช่น แป้งสำหรับทำอาหารที่ให้ความเหนียว น้ำมันพืช และน้ำเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 1000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ต่อมากำลังจัดน้ำมันออกด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ แล้วกรองด้วยตะแกรงเพื่อให้ส่วนผสมเกลือออกมาเป็นลูกบอลเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ระหว่าง 1.4 ถึง 2 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ลูกบอลเกลือเหล่านี้จะถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 755 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงโดยที่ค้างไว้ที่อุณหภูมิ 500 °C อีก 1 ชั่วโมงเพื่อกำจัดตัวยึดอินทรีย์ต่างๆ จึงได้ลูกบอลเกลือสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุนออกมา



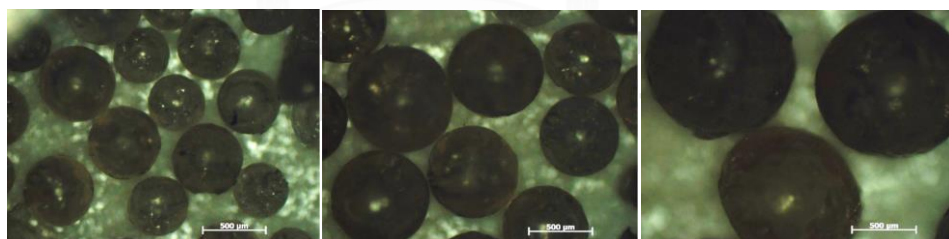
รูปที่ 2.11 (a) ตัวอย่างลูกบอลเกลือขนาดต่างๆสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุน (b) โครงสร้างจุลภาคของลูกบอลเกลือ

- ในงานวิจัยของ Manuela Covaciu และคณะ [11] ได้ทำการเตรียมเกลือโดยการคัดกรองขนาดผงเกลือด้วยตะแกรงให้มีขนาดอยู่ในช่วง 53 ถึง 250 μm แล้วนำไปผสมกับน้ำโดยมีส่วนผสมอยู่ที่เกลือ 20 g และน้ำ 5 ml จะได้เกลือที่มีความหนืดคล้ายยาสีฟัน จากนั้นหยดเกลือลงบนฐานเซรามิกเพื่อกำจัดน้ำส่วนเกินออกทำให้มีรูปร่างทรงกลมขนาด 4 ถึง 5 mm แล้วนำลูกบอลเกลือที่ได้ไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 755 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีลำดับดังรูปที่ 2.12

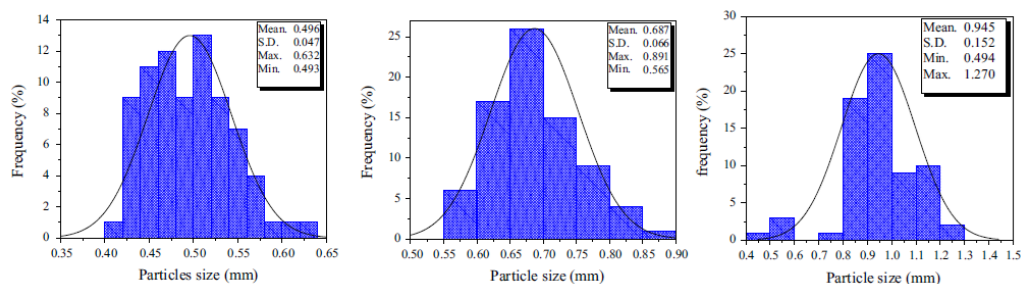


รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการผลิตลูกบอลเกลือด้วยวิธีการหยดลงบนพื้นเซรามิก [12]

- ในการผลิตเกลือรูปร่างทรงกลมในงานวิจัยของ A. SÁNCHEZ [12] อนุภาค NaCl ถูกหลอมเหลวด้วยความร้อนที่มีเชื้อเพลิงมาจากแก๊สโพรเพน จากนั้นเกลือหลอมเหลวถูกแยกออกจากกันเป็นลักษณะหยดด้วยแรงลม ทำให้หยดเกลือเปลี่ยนเป็นของแข็งในระหว่างอยู่ในอากาศ หยดเกลือจะก่อตัวเป็นรูปร่างทรงกลมเนื่องจากความตึงผิวในระหว่างการแข็งตัว เมื่อได้เกลือรูปร่างทรงกลมจะถูกคัดแยกขนาดเป็นค่าเฉลี่ย ได้แก่ 0.50, 0.69, และ 0.95 mm ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดในแต่ละกลุ่มดังรูปที่ 2.14

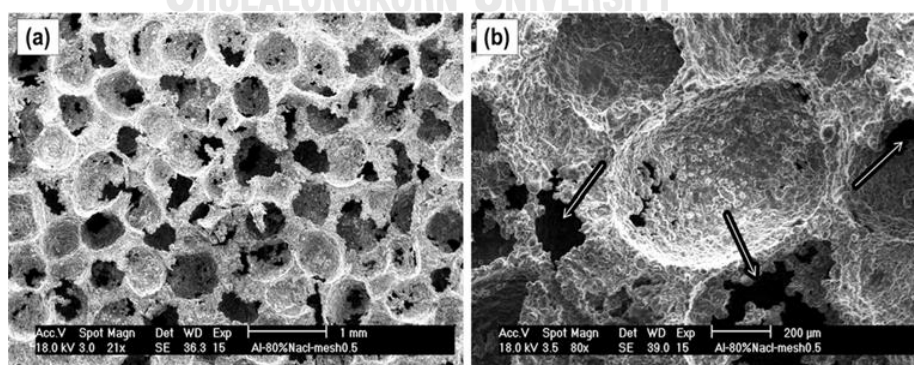


รูปที่ 2.13 ลูกบอลเกลือที่ได้จากการทำให้หยดเกลือแข็งตัวในอากาศขนาด 0.50, 0.69, และ 0.95 mm ตามลำดับจากซ้ายไปขวา



รูปที่ 2.14 ลูกบอลเกลือที่ได้จากการทำให้หยดเกลือแข็งตัวในอากาศขนาด 0.50, 0.69, และ 0.95 mm ตามลำดับจากซ้าย

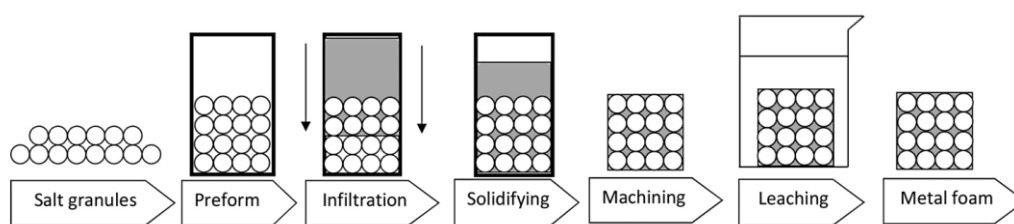
- ในบางกรณีเกลือที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดรูพรุนของโพลีเออะลูมิเนียมมีขนาดเล็กมาก [13] โดยใช้วิธีผสมกับผงอะลูมิเนียมเพื่อขึ้นรูป แล้วถูกกำจัดออกในภายหลัง เช่นงานวิจัยของ Hossein Gilani และคณะ งานวิจัยนี้ได้ใช้ผงอะลูมิเนียมขนาด $30\text{ }\mu\text{m}$ ผสมกับผงเกลือรูปร่างทรงกลมที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุน ที่มีขนาด 0.25, 0.35 และ 0.5 mm ทั้งผงอะลูมิเนียมและเกลือถูกผสมรวมกันจนได้น้ำหนักรวม 20 g ต่อชิ้นงาน ชิ้นงานถูกอัดขึ้นรูปแล้วนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 620, 640, และ 650 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานเย็นลงจะถูกนำไปแช่น้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ ชิ้นงานถูกทำเช่นนี้ซ้ำ 4 ครั้ง เพื่อกำจัดอนุภาคเกลือออกจากโครงสร้างชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นโพลีเออะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิดดัง



รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของโพลีเออะลูมิเนียมที่ใช้เกลือขนาด 0.5 mm เป็นตัวสร้างรูพรุน (a) โครงสร้างรูพรุนโดยรวมของชิ้นงาน b) โครงสร้างระหว่างรูพรุนขนาดเล็กของชิ้นงาน

2.3.7.2 การหล่อโฟมโลหะ

เมื่อได้ลูกบอลเกลือตามขนาดและรูปร่างที่ต้องการแล้ว จะถูกนำมาเติมเต็มในโลหะด้วยวิธีการต่างๆ โดยทั่วไปการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยมีเกลือเป็นตัวสร้างรูพรุนสามารถใช้ได้กับโลหะตั้งต้นที่เป็นน้ำโลหะและผงโลหะ การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีเกลือเป็นตัวสร้างรูพรุนด้วยวิธีการหล่อสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งกระบวนการส่วนมากที่ใช้คือ กระบวนการแทรกซึมด้วยแก๊ส (Gas pressure infiltration) [14] แต่จำเป็นที่จะต้องควบคุมตัวแปรการผลิตหลายตัวแปรและต้นทุนในการผลิตสูง ซึ่งส่วนมากมักจะใช้ในห้วงปฏิบัติการ นอกจากนี้มีกระบวนการหล่ออีกแบบหนึ่งที่สามารถทำได้ทั่วไป คือ กระบวนการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity die casting) เป็นการหล่อโดยการเทอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์โลหะที่มีต้นแบบอยู่และอาศัยแรงโน้มถ่วงช่วยให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวไหลลงไปเติมเต็มแม่พิมพ์ เพื่อความสมบูรณ์ของการหล่อ ควรมีการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งเร็วเกินไปในระหว่างการเทลงในแบบ จนทำให้หล่อโฟมอะลูมิเนียมได้ไม่เต็มแบบ [13] การหล่อแบบนี้มีข้อดีคือ ช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตเหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป แต่ความหนาแน่นของอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแม่พิมพ์จะน้อย หลังจากการเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์แล้วรอให้เย็นตัวและนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกำจัดลูกบอลเกลือออกโดยการละลายน้ำ จะได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด [15] [16]



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการผลิตโฟมโลหะโดยใช้ลูกบอลเกลือสร้างรูพรุน



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโฟมอะลูมิเนียมที่ได้จากการผลิตโฟมโลหะโดยใช้ลูกบอลเกล็ดสร้างรูพรุน [13]

2.3.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

2.3.8.1 ความแข็งแรงของลูกบอลเกล็ด

ความแข็งแรงของตัวสร้างรูพรุนมีความสำคัญ เนื่องจากหากตัวสร้างรูพรุนมีความแข็งแรงไม่เพียงพอในขณะเทน้ำโลหะหรือขณะที่ทำการอัดแรงดันให้น้ำโลหะแทรกซึมไปในต้นแบบ [1] ตัวสร้างรูพรุนอาจจะเกิดการแตกหรือเสียหายได้ ส่งผลให้รูปร่างและขนาดของรูพรุนผิดเพี้ยนไป

2.3.8.2 การจัดเรียงตัวของลูกบอลเกล็ด

ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้ลูกบอลเกล็ดเป็นตัวสร้างรูพรุน การจัดเรียงตัวของลูกบอลเกล็ดลงในแม่พิมพ์มีความสำคัญมาก ลูกบอลเกล็ดทุกลูกบอลจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อภายในเนื้อโฟมโลหะ เพื่อที่จะสามารถกำจัดลูกบอลเกล็ดที่อยู่ภายในโครงสร้างโฟมด้วยการละลายน้ำได้ หากมีเกล็ดตกค้างอยู่ในโครงสร้างโฟมจะทำให้มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนระหว่างเกล็ดและโลหะ [1] จนส่งผลถึงความแข็งแรงของโฟมโลหะนั่นเอง

2.3.8.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต

อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม โดยเฉพาะอุณหภูมิตอนหล่อหรือตอนเทน้ำอะลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลต่อการไหลเต็มเต็มแบบอย่างมาก โดยทั่วไปอุณหภูมิตอนเทน้ำ

โลหะจะอยู่ที่ $650-800^{\circ}\text{C}$ สำหรับอะลูมิเนียม ถ้าให้ความร้อนอะลูมิเนียมให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย เมื่อเทน้ำโลหะจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้น้ำโลหะไหลไม่เต็มแบบ ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมมากเกินไป การเติมเต็มแบบจะเป็นไปด้วยดี แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานรวมถึงอาจมีผลต่อผิวของวัสดุหลังจากการหล่ออีกด้วยเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นควรมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการหล่อและเทน้ำอะลูมิเนียม การไหลตัวที่ดีที่อุณหภูมิสูงของน้ำโลหะจะสัมพันธ์กับความหนืดและความตึงผิวของน้ำโลหะด้วย โดยถ้าความหนืดและความตึงผิวมีค่าต่ำจะมีโอกาสสูงที่น้ำโลหะจะไหลเข้าเต็มแบบ สามารถลดความหนืดของน้ำโลหะได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะหรืออาจจะเติมธาตุผสมบางชนิด เช่น Si หรือ Mg เพื่อลดความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [1]

2.3.8.4 ความหนืดของโลหะหลอมเหลว

ความหนืดจะส่งผลต่อการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียม หากน้ำอะลูมิเนียมมีความหนืดสูงจะทำให้ไหลผ่านลูกบอลเกลียวหรือแม่พิมพ์ได้ยากและไม่ทั่วถึง ส่งผลให้เกิดการแข็งตัวของน้ำอะลูมิเนียมก่อนที่จะเติมลงไปแม่พิมพ์จนเต็ม ดังนั้นน้ำโลหะควรจะมีความหนืดให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การแก้ปัญหาในน้ำอะลูมิเนียมที่มีความหนืดสูงมากคือการเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมขึ้นเล็กน้อย หรือเติมธาตุผสมบางชนิดลงไปเพื่อลดความหนืด เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียม เป็นต้น [1]

2.3.8.5 ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม

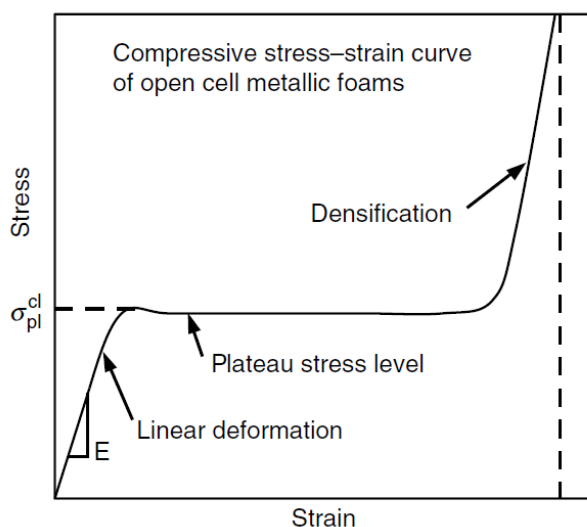
การปรับเปลี่ยนความดันในการแทรกซึมของน้ำโลหะ (Infiltration pressure) ส่งผลให้ความหนาแน่นสัมผัสของโพรมโลหะแตกต่างกันไป เนื่องจากกระบวนการแทรกซึมด้วยความดันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆผ่านอนุภาคที่อัดตัวกัน [1] โดยทั่วไปน้ำโลหะจะไม่มีสมบัติเปียกกับวัสดุแม่พิมพ์หรือตัวสร้างรูพรุน ที่มีพันธะอ็อกซิเจน เช่น เกลือ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แรงดันผลักดันน้ำโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์และป้องกันไม่ให้อลูมิเนียมไหลย้อนกลับคืนมา โดยส่วนใหญ่จะใช้แก๊สอัดความดันเป็นตัวผลักดันน้ำโลหะ ความดันที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณลูกบอลเกลียว ปริมาณน้ำโลหะ และความซับซ้อนของแม่พิมพ์ และหากรูพรุนมีขนาดเล็กยิ่งต้องใช้แรงดันมากขึ้น

2.4 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ

สมบัติของโลหะเนื้อพื้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของโฟมโลหะ ซึ่งสมบัติหลายชนิดไม่เปลี่ยนแปลงแม้ถูกขึ้นรูปเป็นโฟมโลหะ เช่น โครงสร้างผลึก สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และจุดหลอมเหลว เป็นต้น [17] นอกจากนี้ความหนาแน่นของโฟมโลหะก็มีอิทธิพลต่อสมบัติต่างๆ รวมถึงสมบัติทางกลด้วย

2.4.1 พฤติกรรมทางกลในการรับแรงอัดของโฟมโลหะ

ในการรับแรงอัดของโฟมโลหะโดยทั่วไปจะมีพฤติกรรมทางกลแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่การผิดรูปเชิงเส้น (Linear deformation) การผิดรูปในบริเวณที่ราบ (Plateau stress level) และการผิดรูปแบบอัดแน่น (Densification) [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งเป็นพฤติกรรมการรับแรงอัดแบบอุดมคติของโฟมโลหะ [18]

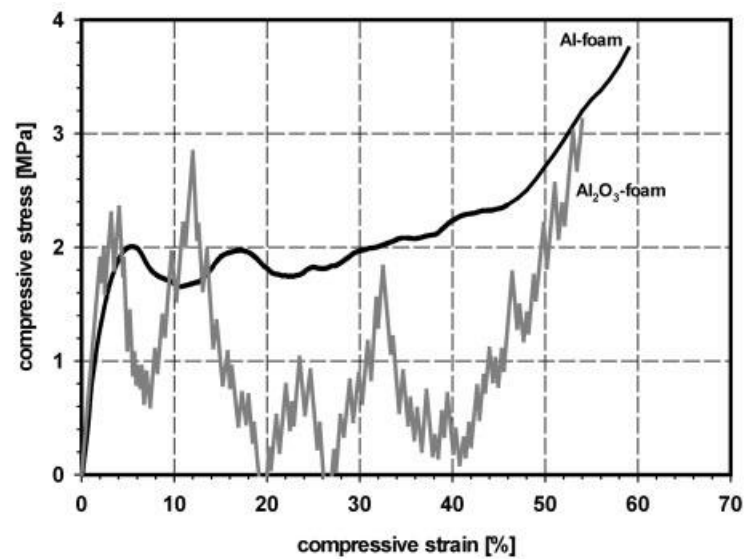


รูปที่ 2.18 แสดงพฤติกรรมในการรับแรงอัดของโฟมโลหะในอุดมคติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง [9]

โดยทั่วไปโฟมโลหะจะแสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดแบบโลหะเหนียว อาจมีรูปแบบหรือกลไกการผิดรูปแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่ใช้ในการผลิตโฟม ในภาพรวมพบว่ามีลักษณะคล้ายกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมพอลิเมอร์ ดังนั้นกลไกการผิดรูปพื้นฐานจึงมีหลักการคล้ายกันคือ ในระยะแรกที่โฟมได้รับแรงกระทำ จะเกิดการดัดเล็กน้อยและส่งผลให้เกิดการยืดตัวและ

หัตถ์ของผนังรูป รุน หากระดับความเค้นที่ผนังรูป รุนมีค่ามากกว่าความเค้นความแข็งแรงจุดครากที่ของวัสดุที่ผลิตโพนจะเกิดการผิดรูปแบบพลาสติกหรือถาวรขึ้น การเกิดการผิดรูปแบบพลาสติกที่ส่วนต่างๆในโครงสร้างของโพน เนื่องจากโพนมีโครงสร้างรูป รุนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้ความเข้มข้นความเค้น บางจุดในโพนที่ระดับความเครียดต่ำมีค่ามากกว่าความเค้นความแข็งแรงจุดครากและเกิดการผิดรูปแบบพลาสติกในช่วงแรกของการอัดตั้งนั้นพฤติกรรมการรับแรงอัดของโพนในช่วงแรก ซึ่งกราฟมีลักษณะการผิดรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นที่แท้จริงจึงเกิดขึ้นได้ยาก การเพิ่มขึ้นของความเค้นในโพนต่อไปจะทำให้เกิดการโก่งตัวของผนังรูป รุนในโครงสร้างบริเวณที่แข็งแรงน้อยที่สุดถัดไป ทำให้เกิดเป็นแถบการผิดรูปแบบ (Deformation band) ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับทิศของแรงกระทำที่การผิดรูปแบบพลาสติกเกิดขึ้น ผลของแถบการผิดรูปแบบที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การผิดรูปแบบในบริเวณที่ราบ รูป รุนที่ผิดรูปแบบพลาสติกจะส่งผลให้รูป รุนข้างเคียงได้รับแรงน้อยลง นำไปสู่การพังของรูป รุนข้างเคียงในที่สุด และเมื่อแถบการผิดรูปแบบเกิดขึ้นต่อเนื่อง ก็จะมีการผิดรูปแบบในบริเวณที่ราบต่อเนื่องที่ระดับความเค้นค่อนข้างคงที่จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงสุดท้ายของการผิดรูปแบบคือการผิดรูปแบบอัดแน่น [18]

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมในการรับแรงอัดของโพนอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโพนโลหะ และโพนอะลูมินาซึ่งเป็นโพนเซรามิก พบว่าพฤติกรรมในการรับแรงอัดแตกต่างกันอย่างมาก โดยโพนอะลูมิเนียมแสดงพฤติกรรมในการรับแรงอัดแบบวัสดุเหนียวและแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังเช่นพฤติกรรมในการรับแรงอัดของโพนโลหะทั่วไป ในขณะที่โพนอะลูมินามีพฤติกรรมในการรับแรงอัดแบบวัสดุเปราะ [19]



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมินา

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการผิดรูปของโฟมในช่วงพลาสติกภายใต้การรับแรงอัดกับวัสดุที่ใช้ผลิตโฟม ($\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}}$) กับค่าสัดส่วนความเค้นของการผิดรูปแบบพลาสติกของโฟมกับวัสดุที่ใช้ผลิตโฟม ($\frac{\rho^*}{\rho_s}$) ดังแสดงใน สมการที่ 2.1 สำหรับโฟมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบปิด และสมการที่ 2.2 สำหรับโฟมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด [1]

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} \approx 0.3(\Phi \frac{\rho}{\rho_s})^{\frac{3}{2}} + 0.4(1 - \Phi) \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.1)$$

$$\frac{\rho_{pl}}{\rho_{y,s}} \approx 0.3(\frac{\rho^*}{\rho_s})^{\frac{3}{2}} \quad (2.2)$$

โดยที่ σ_{pl} คือ ความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟม

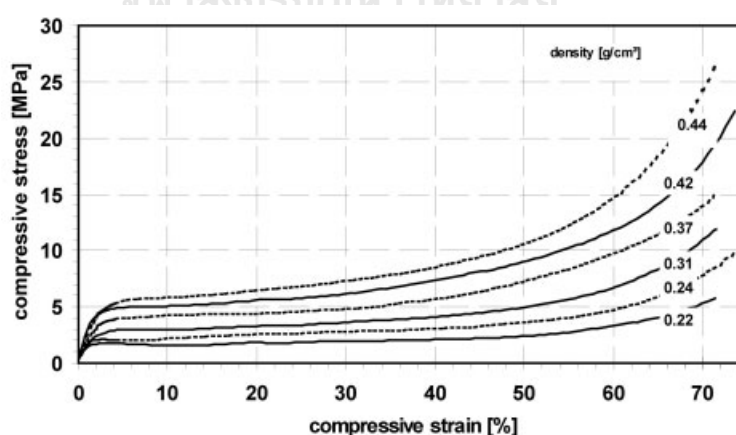
σ_{ys} คือ ความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของของแข็ง

ρ คือ ความหนาแน่นของโฟม

ρ_s คือ ความหนาแน่นของโลหะที่ใช้ผลิตโฟม

Φ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเนื้อโลหะในก้านรูปท่อน

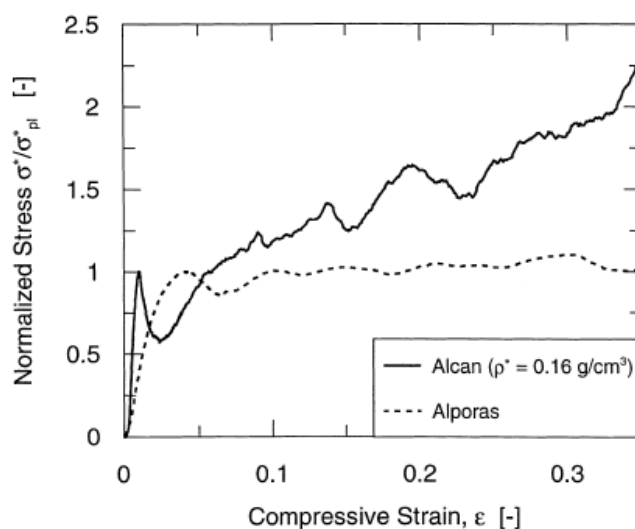
การเพิ่มขึ้นของความเค้นระนาบเป็นผลมาจากการที่โฟมมีส่วนที่เป็นเนื้อโลหะต่อปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นการวัดค่าความเค้นระนาบมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของกราฟความเค้นความเครียด ในกรณีที่กราฟความเค้นความเครียดมีความเค้นสูงสุด (Peak Stress) ที่ช่วงเริ่มต้นของความเค้นระนาบ จะพิจารณาว่าความเค้นสูงสุดนี้เป็นค่าความเค้นระนาบ ในกรณีที่กราฟความเค้นความเครียดไม่มีค่าความเค้นสูงสุด เส้นที่แสดงระดับระนาบจะถูกยืดออกไปที่ระดับความเครียดที่น้อยกว่าจนตัดกับช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น และจะใช้จุดตัดนั้นเป็นค่าของความเค้นระนาบ ระดับของความเค้นระนาบมีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติการดูดซับพลังงานของโฟมโลหะ [20]



รูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นว่าความเค้นระนาบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น

2.4.1.1 โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มี 3 ขั้นตอนเช่นเดียวกับที่เคยกล่าวมาแล้วข้างต้น ลักษณะกราฟความเครียดและความเค้นเป็นดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิดที่ความหนาแน่น 0.16 g/cm^3

[17]

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีการผิดรูปแบบอิลาสติก และแบบพลาสติกเช่นเดียวกับโฟมโลหะทั่วไป [17] ซึ่งช่วงการผิดรูปแบบพลาสติกสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.1

2.4.1.2 โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบเปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบเปิดมีลักษณะคล้ายกับโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด จึงมีการผิดรูปแบบอลาสติก และแบบพลาสติกเช่นเดียวกับโฟมโลหะทั่วไป ซึ่งช่วงการผิดรูปแบบพลาสติกสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.2 อย่างไรก็ตามด้วยลักษณะรูพรุนของโครงสร้างแบบเปิดมีความแตกต่างจากโครงสร้างแบบปิดตรงที่ไม่มีผนังกันระหว่างรูพรุน จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดของโครงสร้างแบบเปิดต่ำกว่า [20]

<i>Property, symbol [units]</i>	<i>Cymat</i>	<i>Alulight</i>	<i>Alporas</i>	<i>ERG</i>	<i>Inco</i>
Material	Al–SiC	Al	Al	Al	Ni
Relative density, ρ/ρ_0	0.02–0.2	0.1–0.35	0.08–0.1	0.05–0.1	0.03–0.04
Structure	Closed cell	Closed cell	Closed cell	Open cell	Open cell
Young's modulus, E [GPa]	0.02–2.0	1.7–12	0.4–1.0	0.06–0.3	0.4–1.0
Poisson's ratio, ν	0.31–0.34	0.31–.34	0.31–0.34	0.31–0.34	0.31–0.34
Compressive strength, σ_{pl} [MPa]	0.04–7.0	1.9–14.0	1.3–1.7	0.9–3.0	0.6–1.1
Tensile elastic limit, σ_y [MPa]	0.04–7.0	2.0–20	1.6–1.8	0.9–2.7	0.6–1.1
Tensile strength, σ_{UTS} [MPa]	0.05–8.5	2.2–30	1.6–1.9	1.9–3.5	1.0–2.4
Endurance limit, σ_e^c [MPa]	0.02–3.6	0.95–13	0.9–1.0	0.45–1.5	0.3–0.6
Densification strain, ϵ_D	0.6–0.9	0.4–0.8	0.7–0.82	0.8–0.9	0.9–0.94
Tensile ductility, ϵ_{UTS}	0.01–0.02	0.002–0.04	0.01–0.06	0.1–0.2	0.03–0.1
Fracture toughness, K_{IC}^c [MPa.m ^{1/2}]	0.03–0.5	0.3–1.6	0.1–0.9	0.1–0.2	0.6–1.0
Thermal conductivity, λ [W/m.K]	0.3–10	3.0–35	3.5–4.5	6.0–11	0.2–0.3
Resistivity, R [$10^{-8}\Omega\cdot m$]	90–3000	20–200	210–250	180–450	300–500

รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของตัวอย่างโฟมโลหะที่รวมทั้งแบบโครงสร้างแบบปิดและแบบโครงสร้างแบบเปิด [20]

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

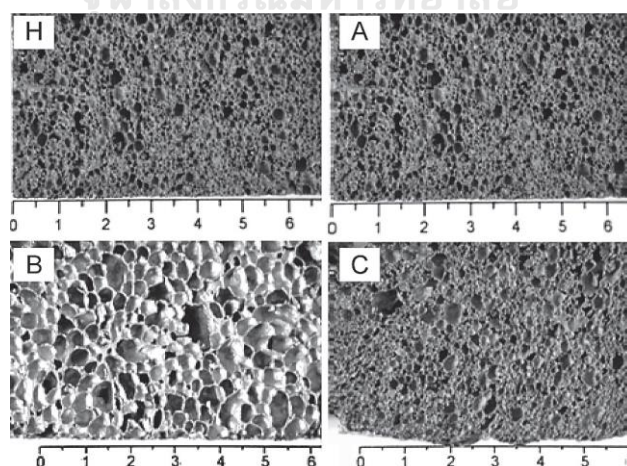
2.4.2.1 ชนิดของวัสดุเนื้อพื้น

สมบัติทางกลของวัสดุโลหะที่ใช้ผลิตโฟมโลหะส่วนใหญ่จะยังคงอยู่แม้ว่าจะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมแล้วก็ตาม เช่น ความแข็งแรงความแข็งแรงจุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความต้านทานต่อแรงอัด แต่จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างโฟมที่ถูกผลิต [2]

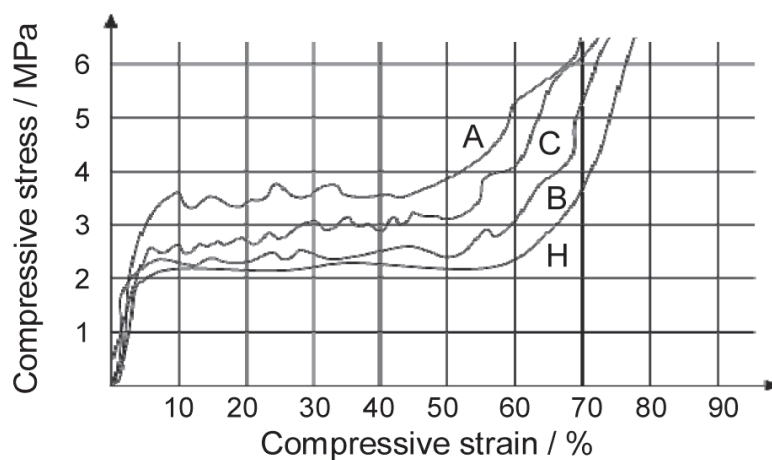
2.4.2.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลโดยเฉพาะความสามารถในการรับแรงอัด โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลให้ความแข็งแรงความแข็งแรงจุดครากสูงขึ้น เนื่องจากโฟมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าจะมีปริมาณรูพรุนในโฟมน้อยและจะมีเนื้อโลหะมาก เมื่อเทียบกับโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า [1]

จากงานวิจัยของ K. GAWDZIŃSKA และคณะ [10] ที่ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมผสม ตัวอย่างที่ใช้เปรียบเทียบมี 4 ชนิดได้แก่ A B C และ H โดยมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.455 0.250 0.301 และ 0.228 g/cm^3 ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวอย่าง A มีความสามารถในการรับแรงอัดได้สูงที่สุด รองลงมาคือ C B และ H ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์นั่นเอง



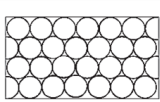
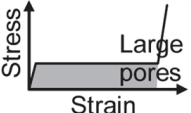
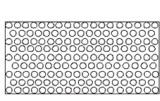
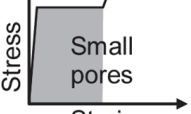
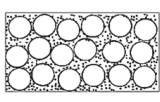
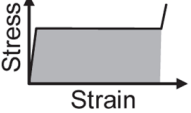
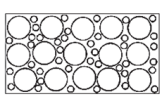
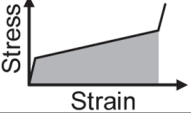
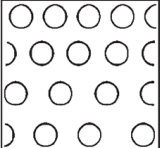
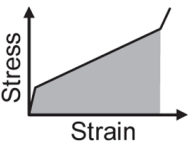
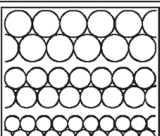
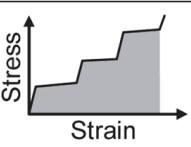
รูปที่ 2.23 โครงสร้างรูพรุนของโฟมอะลูมิเนียมผสมชนิด H (0.228 g/cm^3) A (0.455 g/cm^3) B (0.250 g/cm^3) และ C (0.301 g/cm^3) [6]



รูปที่ 2.24 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมผสมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างกัน [6]

2.4.2.3 ขนาดของรูพรุน

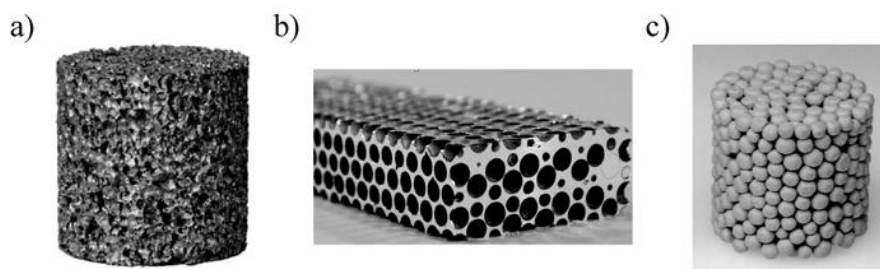
ขนาดของรูพรุนส่งผลต่อความแข็งแรงอัด แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงและความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) ขนาดของรูพรุนจะส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมซึ่งมีผลมากกว่าการนำโฟมไปใช้ในงานโครงสร้าง ขนาดรูพรุนที่เล็กจะมีความหนาของผนังรูพรุนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากโครงสร้างของรูพรุนที่แข็งแรงกว่านี้เองจึงทำให้รูพรุนสามารถที่จะรับแรงอัดก่อนที่จะเกิดการผิดรูปและแตกหักได้มากกว่า และในกรณีที่โฟมมีผนังรูพรุนที่บางกว่า แต่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาแน่นเดียวกันจะเกิดรอยพับและรอยแตกได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีความเข้มข้นความเค้นมากกว่า ทั้งนี้เพราะโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบปิดเมื่อได้รับแรงอัดจะเกิดการโก่งของผนังรูพรุน และเกิดการยืดของผิวของผนังรูพรุน [1]

Schematic structure of foam	Process of metal foam destruction under static load	Remarks on the control of the course of energy absorption by foam
		Change in pore size
		
		Introduction of ceramic particles into metal – composite foams
		Varied size of pores
		Gradient foams. Constant size of pores. Variable thickness of pore walls
		Gradient layered foams. Variable size of pores

รูปที่ 2.25 พฤติกรรมการรับแรงกระทำที่ต่างกันของโฟมที่มีรูพรุนขนาดต่างกัน และการกระจายตัวต่างกัน [6]

2.4.2.4 รูปร่างของรูพรุน

ในทางทฤษฎีรูพรุนจะมีรูปร่างในอุดมคติเป็นแบบหลายด้าน (Polyhedral) แต่ในความเป็นจริงรูพรุนในโฟมโลหะจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันแม้จะอยู่ในชิ้นงานเดียวกันก็ตาม ดังรูปที่ 2.26 รูพรุนที่มีรูปร่างกลมจะมีความแข็งแรงอึดมากกว่ารูพรุนที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากรูพรุนที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอจะมีความเข้มข้นความเค้นสูงบริเวณขอบมุมทำให้เกิดการแตกหักหรือเสียหายได้ง่ายกว่าเมื่อรับแรงกระทำ เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนที่มีรูปร่างกลม [1]



รูปที่ 2.26 โฟมโลหะที่มีรูปร่างของรูพรุนต่างๆ a) รูพรุนรูปร่างไม่แน่นอน b) รูพรุนรูปร่างทรงกลม c) รูพรุนที่เกิดจากช่องว่างระหว่างรูปร่างทรงกลม [14]

2.4.2.5 การกระจายตัวของรูพรุน

โฟมโลหะที่มีช่วงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนน้อย หรือรูพรุนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งโฟม จะมีค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานที่มากกว่าโฟมที่มีช่วงกระจายตัวของขนาดรูพรุนมาก [1] เพราะเมื่อโฟมที่มีรูพรุนไม่สม่ำเสมอได้รับความเค้นจะเกิดความไม่สมดุลของแรงกระทำที่กระจายอยู่ในโครงสร้างของโฟมในแต่ละบริเวณของโครงสร้างโฟมจึงได้รับความเค้นและดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.25

2.4.2.6 ทิศทางของรูพรุน

เมื่อโฟมโลหะได้รับความเค้นอัดในทิศทางขนานกับทิศทางในการผลิตโฟมพบว่าโฟมจะมีความแข็งแรงอัดสูงกว่าโฟมที่ได้รับความเค้นอัดในทิศตั้งฉากกับทิศทางในการผลิตโฟม เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในการรับแรงกระทำในทิศทางขนานกับทิศทางในการผลิตมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ใช้ในการรับแรงกระทำในทิศตั้งฉาก [1] ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงกระทำเท่ากัน นอกจากนี้ในระยการผิดรูปของรูพรุนในทิศทางขนานกับโฟมยังมีมากกว่าด้วย จึงทำให้มีการดูดซับพลังงานที่มากกว่า

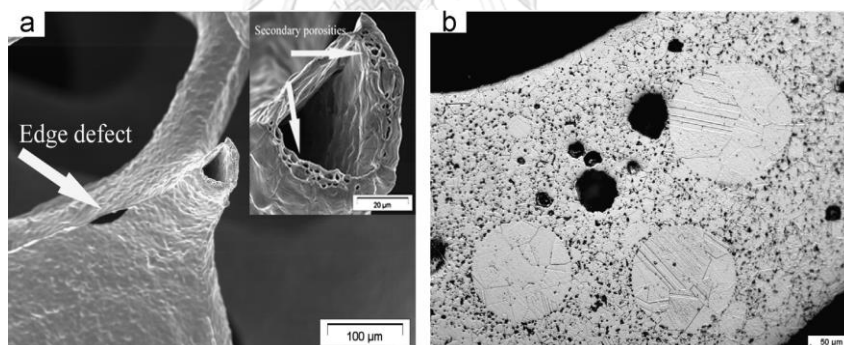
2.4.2.7 อัตราความเครียด

โฟมโลหะได้รับแรงกระทำที่อัตราความเครียดต่ำจะเกิดการโก่งของก้านรูพรุน ซึ่งเป็นกลไกการผิดรูปที่เกิดขึ้นเป็นปกติในโฟมโลหะ อย่างไรก็ตามที่อัตราความเครียดสูงมากๆการโก่งของก้านรู

พูนจะถูกดันไว้โดยแรงเฉื่อยของก้านรูปพูนซึ่งจะช่วยเพิ่มความเค้นความแข็งแรงจุดครากของโพน นอกจากนี้ขณะที่โพนได้รับความเค้นแก๊สที่ไหลระหว่างรูปพูนผ่านช่องว่างที่เกิดจากตำหนิในรูปพูนจะทำให้แรงดันแก๊สภายในรูปพูนเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นและจะส่งผลให้เกิดความเครียดเฉพาะที่ขึ้น ดังนั้นความเค้นระนาบและการดูดซับพลังงานจึงเพิ่มขึ้น [1]

2.4.2.8 ตำหนิของโพนโลหะ

ตำหนิของโพนโลหะส่วนมากจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การบิดของผนังรูปพูน ความหนาของผนังรูปพูนที่ไม่สม่ำเสมอ ช่องว่างในผนังรูปพูนความโค้งของรูปพูนที่มีลักษณะเป็นคลื่น ผนังของรูปพูนเป็นรอยย่น ผิวของโพนโลหะมีลักษณะไม่เรียบและการผิดรูปของรูปพูน หรือรูปพูนขนาดเล็กที่ก้านรูปพูนดังรูปที่ 2.27 โพนโลหะที่มีตำหนิเกิดขึ้นที่ก้านและผนังรูปพูน [1] จะทำให้รูปพูนมีความผิดปกติและมีลักษณะโครงสร้างไม่สม่ำเสมอซึ่งตำหนิเหล่านี้จะทำให้ความแข็งแรงของโพนโลหะลดลง โดยจะเป็นจุดเริ่มต้นของการผิดรูปเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด [21]



รูปที่ 2.27 โครงสร้างจุลภาคของโพนโลหะที่มีตำหนิ a) ตำหนิที่ขอบรูปพูนและรูปพูนขนาดเล็กภายในโครงสร้างของโพนโลหะ b) รูปพูนภายในโครงสร้างโพนโลหะแบบ Cross-section [21]

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- อินกอตอะลูมิเนียมผสม (Aluminium alloy) เกรด ADC12 (JIS)
- ผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์
- เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรด Analytical
- โพลีเอทิลีนไกลคอล 4000 (Polyethylene glycol 4000)
- โบรอนไนไตรด์
- กรดไฮโดรฟลูออริก
- กรดไฮโดรคลอริก
- กรดไนตริก
- น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องบดโดยใช้ลูกบอลโลหะ (Planetary ball mill) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Pulverisette 6 classic line
- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- ปีกเกอร์และแท่งแก้วคน
- เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
- ถาดเหล็กกล้าไร้สนิม (Crucible) หนา 2 mm
- แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการใช้แรงอัด
- แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการหล่อ
- เครื่องขัดชิ้นงาน (Universal milling machine)
- กระดาษทรายและผงเพชรสำหรับขัดชิ้นงาน

- เครื่องเลื่อยชัก (Power hack saw)
- ระบบท่อแก๊สอาร์กอน
- เตาไฟฟ้า Carbolite รุ่น AAF 1100
- เครื่องแวคคัมปั๊ม ยี่ห้อ WOOSUNG VACUUM รุ่น MVP6
- เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Struer รุ่น Acctom-5
- ถังพลาสติกสำหรับละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์
- เครื่องอัดขึ้นรูป
- เครื่องมือทดสอบแรงอัด Universal Testing Machine (UTM)
- กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-IT300
- เครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร (Microtomography or micro-CT) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น SKYSCAN 1173
- เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analyzer) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 Tarsus

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

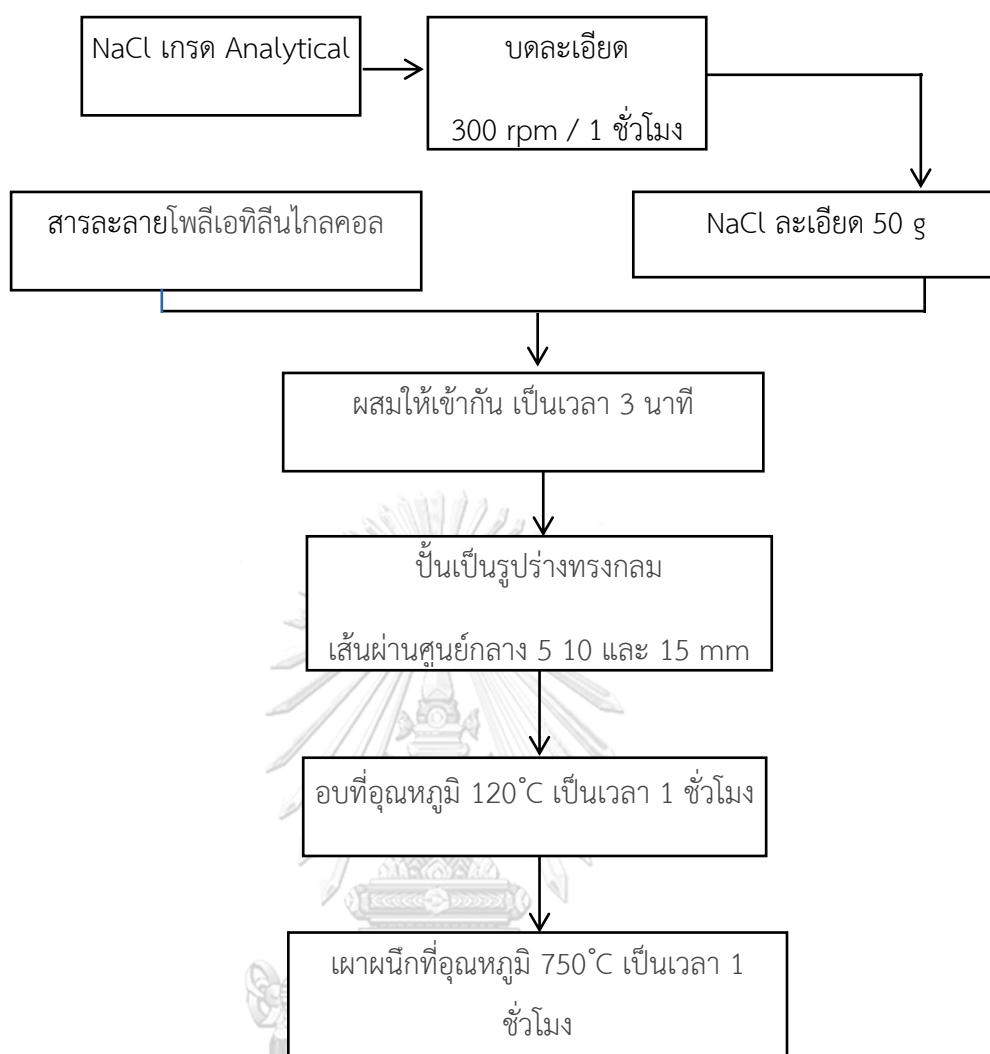
3.3.1 การเตรียมลูกบอลเกลือสำหรับใช้เป็นตัวสร้างรูพรุน

- นำเกลือ (NaCl) เกรด Analytical ปริมาณ 200 g บดละเอียดด้วยเครื่องบด โดยใช้ความเร็วรอบ 350-400 rpm เป็นระยะเวลา 30-60 min
- เตรียมสารเชื่อมประสาน โดยนำโพลีเอทิลีนไกลคอลผสมน้ำ โดยมีความเข้มข้น 20% จากนั้นให้ความร้อน 80 °C แล้วใช้แท่งแก้วคนเพื่อให้สารละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- ผสมส่วนผสมได้แก่ เกลือ 50 g สารละลายโพลีเอทิลีนไกลคอล ปริมาณ 5 ml แล้วคนจนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ
- นำส่วนผสมมาปั้นเป็นรูปร่างทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 10 และ 15 mm โดยใช้การปั้นด้วยมือ โดยควบคุมให้ลูกบอลเกลือขนาด 5, 10 และ 15 mm มีน้ำหนัก 0.2, 1.2 และ 4 กรัมตามลำดับ

- ควบคุมขนาดและรูปร่างลูกบอลเกล็ดด้วยเครื่องควบคุมขนาดลูกบอลเกล็ดดังรูปที่ 3.1
- เมื่อได้ลูกบอลเกล็ดรูปร่างทรงกลมขนาดต่างๆแล้ว นำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- นำลูกบอลเกล็ดเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$



รูปที่ 3.1 เครื่องควบคุมขนาดลูกบอลเกล็ด



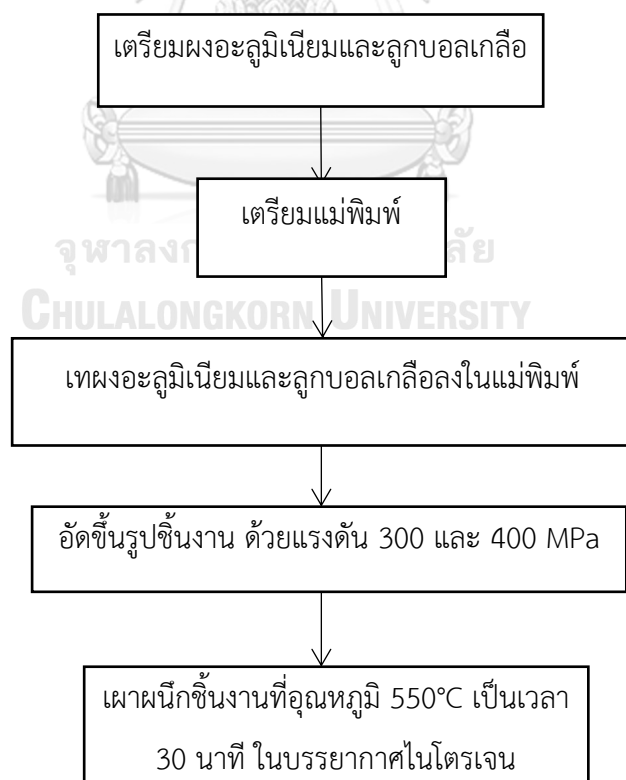
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตลูกบอลกลี้อรูปร่างทรงกลม

3.3.2 การขึ้นรูปโฟมอะลูมิเนียม

การขึ้นรูปโฟมอะลูมิเนียมถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การอัดขึ้นรูป และการหล่อขึ้นรูป

3.3.2.1 การขึ้นรูปโฟมอะลูมิเนียมโดยการอัดขึ้นรูป

- ชั่งน้ำหนักผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 30 g และเตรียมลูกบอลเกลื่อนขนาด 5 mm น้ำหนัก 16 g
- เตรียมแม่พิมพ์โดยการทำความสะอาดแม่พิมพ์ และใช้แมกนีเซียมสเตียเรตทาที่ผิวด้านในของแม่พิมพ์ให้ทั่ว
- จัดวางลูกบอลเกลื่อนสลับกับการเทผงอะลูมิเนียมทีละชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนา 5 mm เพื่อให้ผงอะลูมิเนียมแทรกอยู่ในโครงสร้างทั่วทั้งชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความสูงประมาณ 30 mm
- ใช้เครื่องอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงดัน 300 และ 400 MPa จากนั้นนำชิ้นงานออกมาจากแม่พิมพ์
- นำชิ้นงานที่ได้ไปเผาผืนิกในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 30 นาทีด้วยอัตราการให้ความร้อน 13 °C/min ในบรรยากาศไนโตรเจน

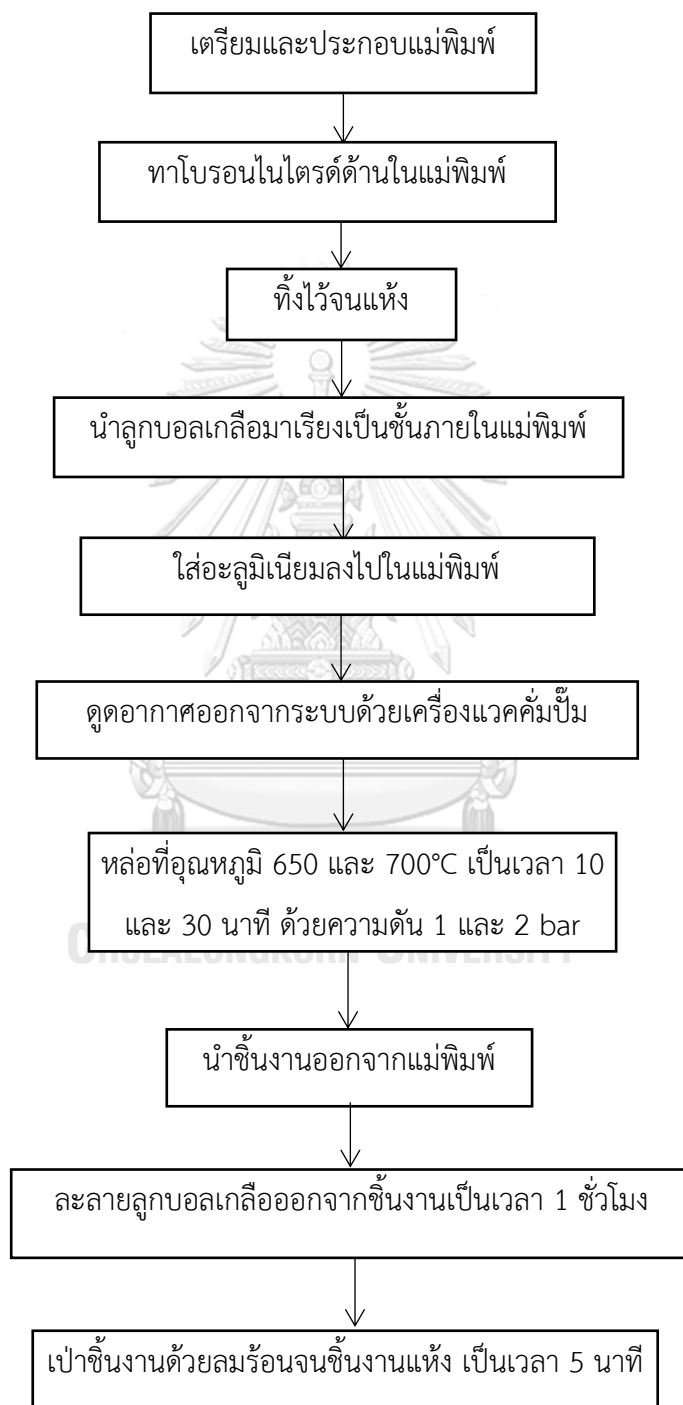


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยการอัดขึ้นรูป

3.3.2.2 การขึ้นรูปโฟมอะลูมิเนียมโดยการหล่อขึ้นรูป

- เตรียมแม่พิมพ์โดยการทาโบรอนไนไตรด์ที่ผิวด้านในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ฐานแผ่นเหล็กและในร่องบากบนแผ่นเหล็ก ซึ่งแม่พิมพ์นี้จะมีลักษณะพิเศษคือ มีท่อสำหรับลำเลียงแก๊สอาร์กอนอยู่ด้านบน
- ตัดแผ่นประกันให้มีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดใกล้เคียงกับเส้นรอบวงของแม่พิมพ์ทรงกระบอกส่วนกลางจำนวน 2 ชิ้น
- ประกอบแม่พิมพ์ส่วนฐานและส่วนกลางเข้าด้วยกันโดยมีแผ่นประกันที่ถูกตัดให้พอดีกับแบบโดยแทรกอยู่ระหว่างชิ้นส่วนทั้งสอง แล้วทาโบรอนไนไตรด์บริเวณรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและฐานแผ่นเหล็กแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง
- นำลูกบอลเกลื่อนขนาด 5 mm ที่ผ่านการเผาผนึกแล้วโดยมีน้ำหนักรวม 23 g เทใส่ลงไปในแม่พิมพ์ทรงกระบอก แล้วเขย่าแม่พิมพ์เบา ๆ 5 ครั้ง เพื่อให้ลูกบอลเกลื่อนที่อยู่ด้านในกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ
- เตรียมอะลูมิเนียมโดยการตัดชิ้นส่วนอินกอตอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ให้มีขนาดเล็กเพียงพอต่อการบรรจุลงในแม่พิมพ์ โดยมีน้ำหนักรวม 60 g
- ใส่อะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ลงไปในแม่พิมพ์ทีละชิ้น แล้วจัดเรียงให้ทุกชิ้นสามารถบรรจุลงไปในแม่พิมพ์ได้พอดี
- ปิดฝาด้านบนของแม่พิมพ์โดยมีแผ่นประกันแทรกอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ทรงกระบอกและฝาด้านบน จากนั้นขึ้นน็อตทั้ง 4 มุม โดยที่ค่อย ๆ ทำให้แต่ละมุมแน่นขึ้นอย่างช้า ๆ พร้อม ๆ กันเพื่อป้องกันไม่ให้ฝาด้านบนเอียงไปทางใดทางหนึ่ง
- นำอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเข้าเตาเผาไฟฟ้า แล้วประกอบท่อที่ด้านบนของแม่พิมพ์เพื่อต่อเข้ากับระบบแก๊สอาร์กอน จากนั้นดูดอากาศออกจากระบบด้วยเครื่องแวคคัมปั้ม
- เผาที่อุณหภูมิ 650 และ 700 °C เป็นเวลา 10 และ 30 นาที และใช้ความดันแก๊สอาร์กอน 1 และ 2 bar ด้วยอัตราการให้ความร้อน 13 °C/min แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา
- นำอุปกรณ์ทั้งหมดออกมาจากเตาและชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมออกจากแม่พิมพ์
- นำชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่มีลูกบอลเกลื่อนอยู่ภายในไปละลายลูกบอลเกลื่อนออกในถังที่ใส่น้ำไว้ โดยเปลี่ยนน้ำทุกๆ 15 นาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- เช็ดและเป่าลมร้อนให้แห้ง เป็นเวลา 5 นาที ได้ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบค่าต่าง ๆ และทดสอบสมบัติทางกลต่อไป



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยการหล่อขึ้นรูป

3.4 การคำนวณค่าต่างๆที่สัมพันธ์กับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้เกลือเป็นตัวสร้างรูพรุน

3.4.1 ความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียม

ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสมก่อนนา ไปละลายต้นแบบ ρ_c สามารถคำนวณได้จากกฎการผสม (Rule of mixture) ตามสมการที่ 3.1

$$\rho_c V_c = \rho_{Al} V_{Al} + \rho_{NaCl} V_{NaCl} \quad (3.1)$$

โดยที่ ρ_c คือ ความหนาแน่นของวัสดุผสมก่อนละลายลูกบอลเกลือ (g/cm^3)

ρ_{Al} คือ ความหนาแน่นของอะลูมิเนียม (g/cm^3)

ρ_{NaCl} คือ ความหนาแน่นของเกลือ NaCl เท่ากับ 2.17 g/cm^3

V_c คือ ปริมาตรของวัสดุผสมก่อนละลายลูกบอลเกลือ (cm^3)

V_{Al} คือ ปริมาตรของอะลูมิเนียมก่อนละลายลูกบอลเกลือ (cm^3)

V_{NaCl} คือ ปริมาตรของเกลือ NaCl ก่อนละลายลูกบอลเกลือ (cm^3)

และสามารถหาความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมหลังจากละลายลูกบอลเกลือในวัสดุผสมออก โดยใช้สมการที่ 3.2 ในการคำนวณ

$$\rho_{foam} = \frac{\rho_{Al} V_{Al}}{V_c} \quad (3.2)$$

3.4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม ρ^* หรือ Relative Density มีหน่วยเป็น % ซึ่งแสดงอยู่ในรูปสัดส่วนโดยปริมาตรของโลหะที่ใช้ผลิตโฟมโลหะ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$\rho^* = \frac{\rho_{foam}}{\rho_s} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ ρ_s คือ ความหนาแน่นของโลหะที่ใช้ผลิต (g/cm^3)

3.4.3 ปริมาณความพรุนของโพนอะลูมิเนียม

ปริมาณความพรุน (P) ของโพนอะลูมิเนียมมีหน่วยเป็น % แสดงในรูปของส่วนต่างของความหนาแน่น สัมพัทธ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$P = 100 - \rho \quad (3.4)$$

3.5 การตรวจสอบโครงสร้าง

3.5.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้าง

ผ่าชิ้นงานโพนอะลูมิเนียมตามแนวตั้งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาค อีกส่วนหนึ่งนำไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 400, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6 และ 1 μm ตามลำดับ แล้วนำไปกัดพื้นผิวด้วยสารละลายที่ประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก 2 ml, กรดไฮโดรคลอริก 3 ml, กรดไนตริก 5 ml และน้ำ 190 ml โดยแช่ผิวชิ้นงานในสารละลาย 60 วินาที เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

นำตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมาตรวจสอบโครงสร้างภายนอก และผ่าชิ้นงานตามแนวตั้งกลางชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบบริเวณผิวภายนอกและภายในชิ้นงาน และการเชื่อมต่อของรูพรุน

3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจสอบโครงสร้างลูกบอลเกลียวทั้งก่อนการนำไปเผาผนึกและหลังการนำไปเผาผนึก ตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานโพนโลหะทั้งภายนอกและภายในที่เคยติดต่อกับลูกบอลเกลียว

3.6 ทดสอบการรับแรงอัด

3.6.1 ลูกบอลเกลียว

นำลูกบอลเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 10 และ 15 mm ทั้งก่อนและหลังเผาผนึก ไปทดสอบแรงอัดโดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงอัด Universal Testing Machine ขนาด 10 ตัน อัตราเร็วในการกด 1 mm/min โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและบันทึกผล

3.6.2 โฟมอะลูมิเนียม

เตรียมชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมโดยการตัดแต่งชิ้นงานให้มีความสูง 30 mm และมีผิวเรียบ เพื่อให้อยู่ในระนาบตรงเมื่อวางที่แท่นวางชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานได้รับแรงกดที่คงที่เท่ากันทั่วทั้งชิ้น จากนั้นใช้เครื่องมือทดสอบแรงอัด Universal Testing Machine ขนาด 100 ตัน ใช้อัตราเร็วในการกด 1 mm/min โดยเก็บผลทดสอบที่ระยะอัด 0-50% เนื่องจากเป็นช่วงที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแสดงพฤติกรรมในการรับแรงอัดได้ชัดเจนที่สุด ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและบันทึกผลซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาสมบัติทางกลได้ดังนี้

3.6.3 ความแข็งแรงความแข็งแรงจุดคราก

สามารถหาค่าความแข็งแรง ณ ความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) ได้โดยลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกที่เป็นเส้นตรงให้ตัดแกนที่ 0.2% ของค่าความเครียด ซึ่งจุดที่เส้นขนานตัดกับกราฟความเค้นความเครียดคือความแข็งแรงความแข็งแรงจุดคราก มีหน่วยเป็น MPa

3.6.3.1 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน

สามารถหาค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption, E) ได้โดยหาพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียดที่ศูนย์จนถึงค่าความเครียด ณ ช่วงการอัดแน่นซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$E = \int_0^{\epsilon_D} \sigma \cdot \epsilon \cdot d\epsilon \quad (3.5)$$

โดยที่ σ = ความเค้น (Mpa)

ϵ = ความเครียด

ทำการอินทิเกรตจาก 0 ถึงค่า ϵ_D (Densification strain) ซึ่งค่า ϵ_D หาได้จากสมการ

$$\varepsilon_D = 0.8 - 1.75(\rho_f/\rho_s) \quad (3.6)$$

โดยที่ ρ_f = ความหนาแน่นของโฟมโลหะ

ρ_s = คือความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ

3.7 สมบัติด้านการละลายน้ำของลูกบอลเกลือ

ตรวจสอบสมบัติด้านการละลายน้ำของลูกบอลเกลือ โดยการแช่ลูกบอลเกลือในบีกเกอร์ที่มีน้ำอยู่ 200 ml จากนั้นจับเวลาการละลายของลูกบอลเกลือ

3.8 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของลูกบอลเกลือ

ตรวจสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของลูกบอลเกลือ และโฟมอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ

3.9 สมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือ

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือก่อนการเผาผนึกด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป (Thermalgravimetric Analysis, TGA) โดยการใช้อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 750°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 13 °C/min ในบรรยากาศปกติ และทดสอบลูกบอลเกลือหลังการเผาผนึกพร้อมผงอะลูมิเนียมที่ถูกอัดขึ้นรูป โดยการใช้อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 550°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 13 °C/min ในบรรยากาศไนโตรเจน

3.10 โครงสร้างภายในของโฟมอะลูมิเนียม

ตรวจสอบโครงสร้างภายในของโฟมอะลูมิเนียม สามารถทำได้ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร หรือไมโครซีที โดยถ่ายภาพเอ็กซ์เรย์ทั้งชิ้นงาน 1 ภาพ และหน้าตัดชิ้นงานจำนวน 900-1000 ภาพ โดยแต่ละภาพเลื่อนขึ้นจากด้านล่างของชิ้นงาน 0.03 mm ซึ่งเมื่อได้ผลการตรวจสอบแล้ว จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างภายในของโฟมอะลูมิเนียมได้ เพื่อตรวจสอบลักษณะรูพรุนของชิ้นงาน และตรวจสอบว่ามีลูกบอลเกลือค้างอยู่ในโครงสร้างหรือไม่

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติทางกายภาพของเกล็ด

4.1.1 ขนาดของอนุภาคเกล็ด

การกระจายตัวและขนาดอนุภาคของเกล็ดก่อนบดลดขนาดที่ถูกทดสอบด้วย MALVERN Mastersizer 3000 Laser Particle Size Distribution (PSD) Analyzer โดยวิเคราะห์จากตัวอย่างเกล็ดก่อนบดลดขนาด เกล็ดที่บดลดขนาดที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที เวลา 30, 45 และ 60 นาที และที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าอนุภาคของเกล็ดก่อนบดลดขนาด มีการกระจายตัวของขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน กล่าวคือขนาดของอนุภาคเกล็ดก่อนบดลดขนาดที่ผสมกันอยู่มีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อบดลดขนาดเกล็ด โดยเริ่มจากความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที พบว่า อนุภาคเกล็ดทุกขนาดมีขนาดเล็กลดลงเกิน 50% เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวขนาดอนุภาคที่ D_{50} นอกจากนี้เมื่อบดลดขนาดโดยใช้เวลานานขึ้นทุก 15 นาที จะลดขนาดได้มากขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อทดสอบบดลดขนาดโดยใช้ความเร็วรอบสูงขึ้นเป็น 400 รอบต่อนาที จะยิ่งส่งผลให้ขนาดอนุภาคเกล็ดลดลงไปได้มากกว่าการบดลดขนาดที่ความเร็ว 350 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที เสียอีก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

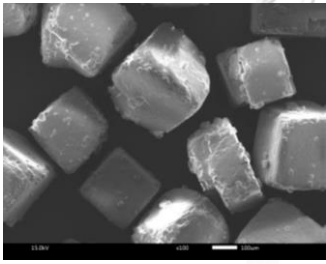
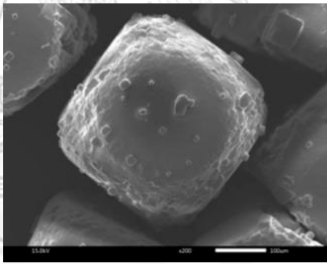
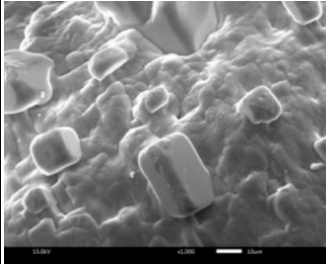
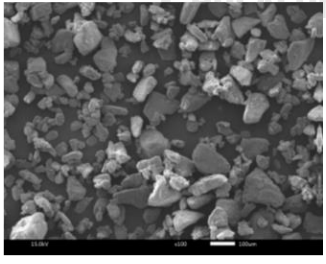
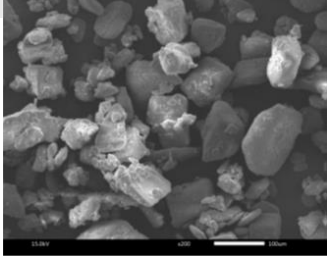
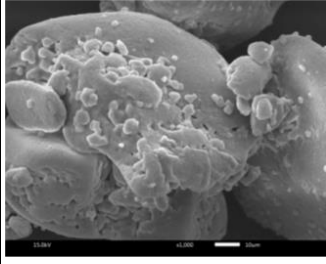
ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวและขนาดอนุภาคของเกล็ดก่อนและหลังบดลดขนาด

ความเร็ว (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D[4,3]$ (μm)	$D[3,2]$ (μm)
ก่อนบดลดขนาด		304.0	436.0	625.3	452.0	420.0
350	30	65.9	240.7	457.7	255.0	127.7
350	45	59.1	220.0	421.0	233.0	122.0
350	60	56.2	209.0	406.7	223.3	111.7
400	30	36.9	168.7	355.0	184.7	77.0

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของเกลือ

โครงสร้างจุลภาคของเม็ดเกลือก่อนถูกบดลดขนาดและขึ้นรูปเป็นเม็ดกลม ถูกวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในตารางที่ 4.2 แลวบน รูปร่างของอนุภาคเกลือมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ หรือเป็นรูปร่างที่มีเหลี่ยมมุมชัดเจน ผิวค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นรูปร่างโดยธรรมชาติของอนุภาคเกลืออยู่แล้ว อีกทั้งมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ เมื่อถูกบดลดขนาดแล้วจะมีลักษณะดังตารางที่ 4.2 แลวล่าง พบว่ามีรูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคแตกเป็นชิ้นที่มีขนาดเล็กลงและมีผิวขรุขระ แม้ว่าอนุภาคทั้งหมดจะมีขนาดเล็กลง แต่พบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคยังไม่สม่ำเสมอเท่ากับอนุภาคเกลือก่อนการบดลดขนาด ยังสังเกตเห็นความแตกต่างของขนาดอนุภาคได้บ้าง

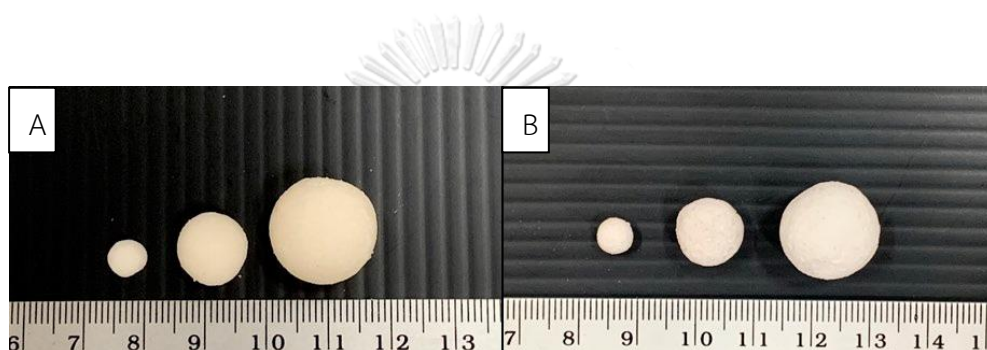
ตารางที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเกลือก่อนขึ้นรูป

	100x	200x	1000x
ก่อนบดลดขนาด			
หลังบดลดขนาด			

4.2 สมบัติของลูกบอลเกลือ

4.2.1 ลักษณะของลูกบอลเกลือที่ขึ้นรูปแล้วก่อนและหลังเผา

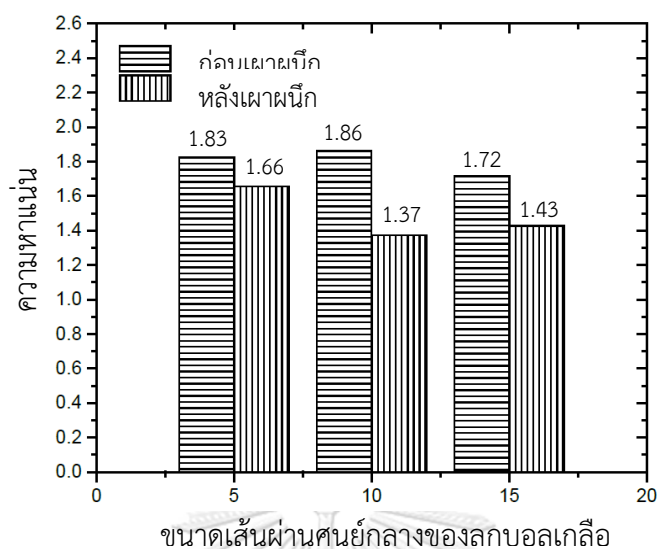
รูปร่างของลูกบอลเกลือหลังจากขึ้นรูปเป็นทรงกลม แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเกลือสามารถปั้นด้วยมือให้เป็นทรงกลมได้ โดยมี สารละลาย PEG เป็นตัวเชื่อมประสาน สีของลูกบอลเกลือหลังจากขึ้นจะเป็นสีขาวอมเหลือง หลังจากนั้นเมื่อลูกบอลเกลือถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าสีของลูกบอลเกลือเปลี่ยนไปเป็นขาวอมเทา มีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเนื่องจากการสลายตัวของน้ำและตัวเชื่อมประสานในโครงสร้างลูกบอลเกลือ และไม่พบรอบแตกหรือเกิดความเสียหายใดๆ



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบของลูกบอลเกลือ 3 ขนาด ได้แก่ 5, 10 และ 15 mm (A) ระหว่างก่อนเผาผนึก และ (B) หลังเผาผนึก

4.2.2 ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือ

ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือก่อนเผาผนึกและหลังเผาผนึก แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือทุกขนาดหลังเผาผนึกลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการสลายตัวของน้ำและตัวเชื่อมประสานในลูกบอลเกลือแม้ว่าปริมาตรของลูกบอลเกลือจะลดลงด้วยก็ตาม ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือขนาด 10 mm, 15 mm และ 5 mm มีความแตกต่างกันระหว่างก่อนและเผาผนึกมากที่สุดไปน้อยที่สุดตามลำดับ ซึ่งไม่มีแนวโน้มของการลดลงของความหนาแน่นอย่างชัดเจน

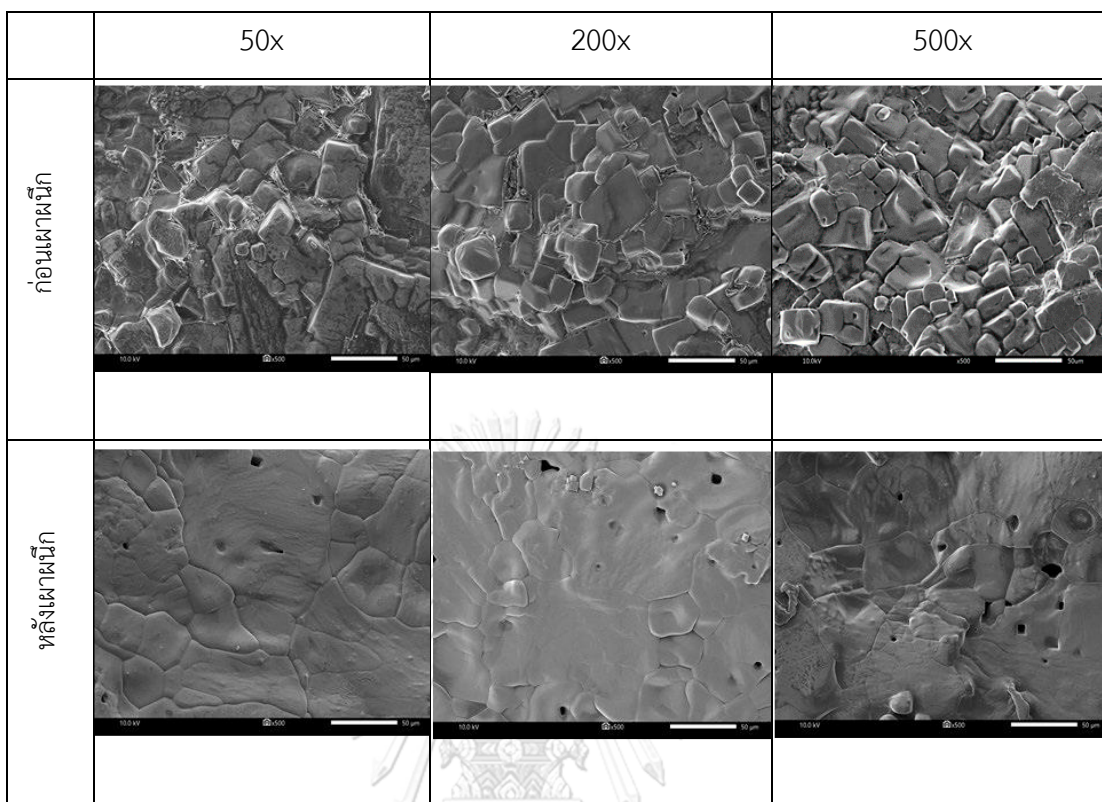


รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของลูกบอลเกลียวก่อนเป่าลมและหลังเป่าลม

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของลูกบอลเกลียว

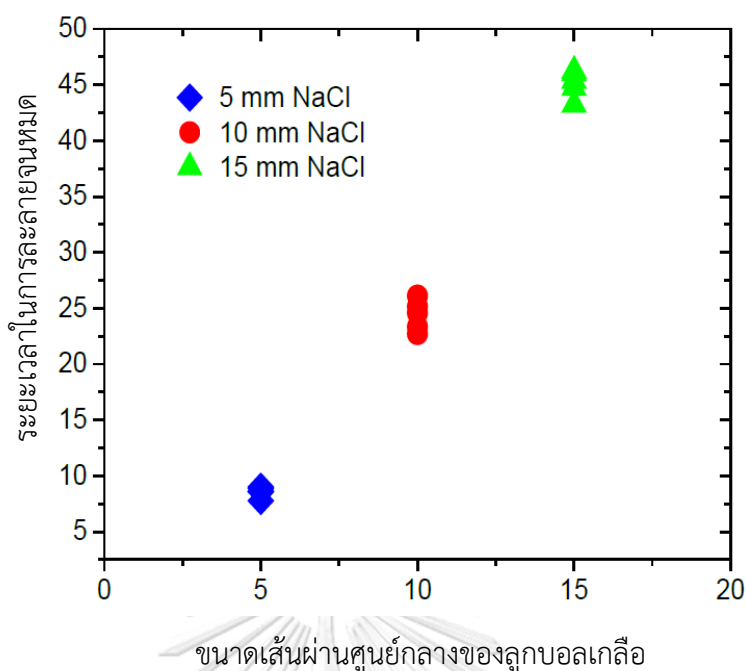
เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบนผิวของลูกบอลเกลียวทั้งก่อน และหลังเป่าลมพบว่า ผิวของลูกบอลเกลียวก่อนเป่าลมนั้นมีลักษณะขรุขระ สัมผัสเห็นอนุภาคเกลียวเกาะตัวกันค่อนข้างชัดเจน เมื่อเป่าลมแล้ว พบว่าพื้นผิวของลูกบอลเกลียวเชื่อมกันจนเกือบจะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ยังพบรูพรุนกระจายอยู่ตามผิวของลูกบอลเกลียวอยู่บ้าง ดังตารางที่ 4.3 แต่รูพรุนไม่มากจนเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวโดยรวมของลูกบอลเกลียวหลังเป่าลม นอกจากนี้พบว่าลูกบอลเกลียวบางลูกแตกร้าวเสียหายหลังการเป่าลม โดยมีจำนวนเพียงเล็กน้อยต่อการเป่าลมหนึ่งครั้ง

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวของลูกบอลเกลือ



4.2.4 ความสามารถในการละลายน้ำของลูกบอลเกลือ

ลูกบอลเกลือหลังเผาผนึกแต่ละขนาดถูกนำมาทดสอบความสามารถในการละลาย โดยการแช่ในน้ำเปล่าแล้วจับเวลา ผลคือลูกบอลเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ใช้เวลาในการละลายจนหมดประมาณ 7-9 นาที ในขณะที่ลูกบอลเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ใช้เวลาในการละลายจนหมด 22-26 นาที และลูกบอลเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ใช้เวลาในการละลายจนหมด 43-46 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้การทดสอบเป็นเพียงการคาดคะเนเวลาอย่างน้อยที่ใช้ในการละลายลูกบอลเกลือออกจากโครงสร้างโพลิเมอร์ หลังจากเผาผนึกหรือหลอมโพลิเมอร์เรียบร้อยแล้ว เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นที่ทำให้เวลาในการกำจัดลูกบอลเกลือ เช่น โครงสร้างที่ซับซ้อนของโพลิเมอร์ทำให้ลูกบอลเกลือละลายออกมาจากโครงสร้างได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.3 ความสามารถในการละลายน้ำของลูกบอลเกลือทั้งสามขนาด

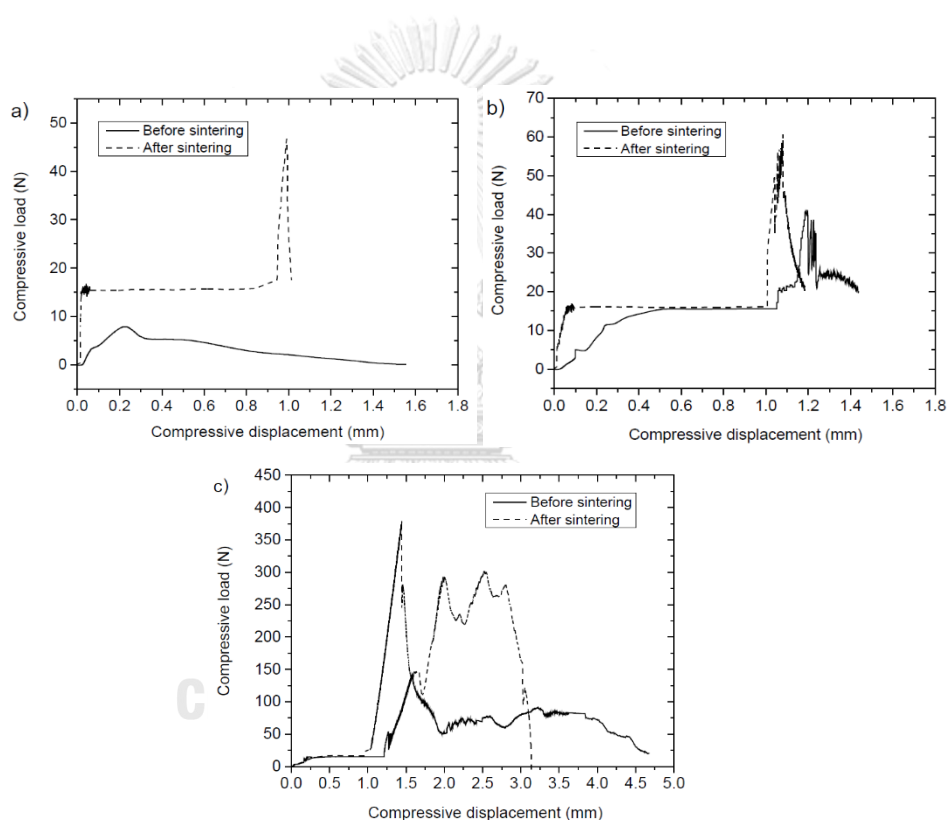
4.2.5 ความแข็งแรงของลูกบอลเกลือ

ความแข็งแรงของลูกบอลเกลือจากการทดสอบโดยการรับแรงอัดในแกนตั้ง แสดงดังรูปที่ 4.4 พฤติกรรมการรับแรงอัดของลูกบอลเกลือก่อนการเผาผนึกทุกขนาด มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งจุดสูงสุดของแรงที่ใช้อัด รูปร่างหรือพื้นที่ใต้กราฟของการรับแรงอัด หรือแม้กระทั่งระยะการอัดที่ทำให้เกิดจุดสูงสุด จะแตกต่างกัน ในขณะที่ลูกบอลเกลือหลังเผาผนึกมีลักษณะการรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกันมากกว่าก่อนเผาผนึก โดยที่เริ่มจากรับแรงอัดในระยะกดยสั้นๆ แล้วแรงสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้น แรงคงที่อยู่มักระยะกดยจะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่เกิดจุดสูงสุดของแรง ที่แรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นแรงก็ตกลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน

ผลการทดสอบการรับแรงอัดของลูกบอลเกลือถูกนำมาเปรียบเทียบระหว่างลูกบอลเกลือก่อนเผาผนึกและหลังเผาผนึก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าความแข็งแรงของลูกบอลเกลือทุกขนาดหลังเผาผนึกสูงกว่าก่อนเผาผนึก ลูกบอลเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ก่อนเผาผนึกสามารถรับแรงอัดในแนวแกนตั้งได้ไม่ถึง 10 นิวตัน แต่เมื่อเผาผนึกแล้วสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นถึง 48 นิวตัน ซึ่งหลังจากนั้นแรงที่ลูกบอลเกลือได้รับลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงถึงการเปลี่ยนรูปของลูกบอลเกลือ ลูกบอลเกลือ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ก่อนเผาผนึกสามารถรับแรงอัดในแนวแกนตั้งได้ประมาณ 40 นิวตัน แต่เมื่อเผาผนึกแล้วสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นถึง 62 นิวตัน และลูกบอลเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ก่อนเผาผนึกสามารถรับแรงอัดในแนวแกนตั้งได้ประมาณ 130 นิวตัน แต่เมื่อเผาผนึกแล้วสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นถึง 380 นิวตัน

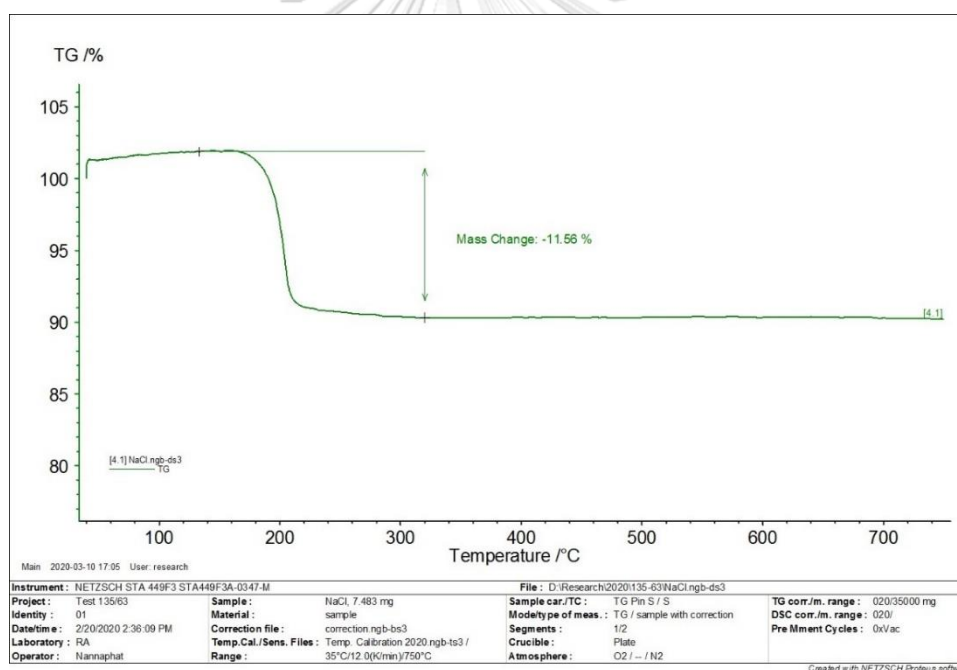
ความสามารถในการรับแรงที่เพิ่มขึ้นเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการแทนที่ช่องว่าง โดยที่มีลูกบอลเกลือทำหน้าที่เป็นตัวแทนที่ช่องว่าง หากลูกบอลเกลือมีความแข็งแรงต่ำ โครงสร้างอาจเกิดความเสียหายในระหว่างการผลิตโฟมอะลูมิเนียมได้



รูปที่ 4.4 แสดงความสามารถในการรับแรงอัดของลูกบอลเกลือก่อนเผาผนึกและหลังเผาผนึกทั้ง 3 ขนาด a) 5 mm b) 10 mm และ c) 15 mm

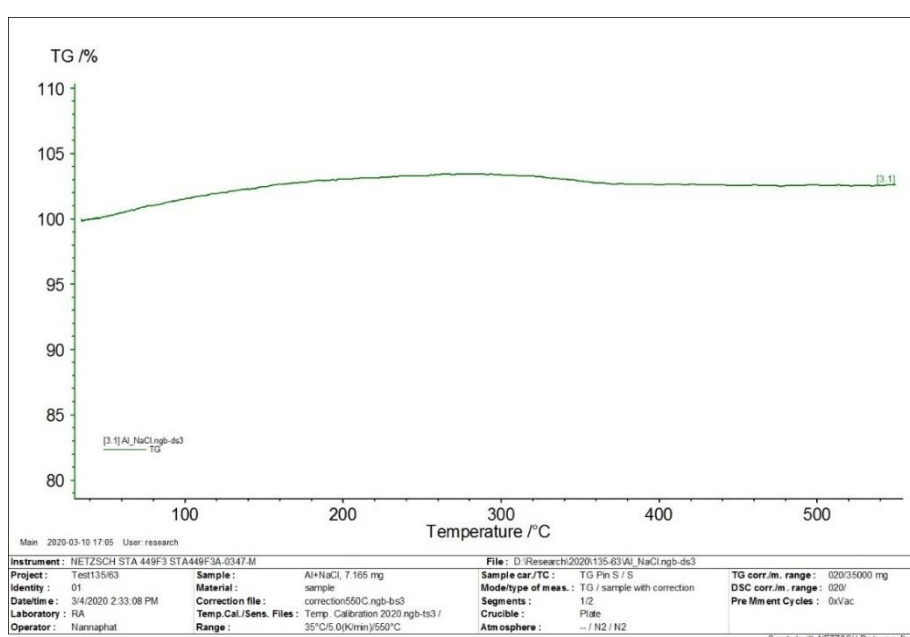
4.2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป

ตัวอย่างลูกบอลเกลือขนาด 5 mm ก่อนถูกเผาผนึก ถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป (Thermalgravimetric Analysis, TGA) จากรูปที่ 4.5 แกนแนวตั้งแสดงถึงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป และแกนแนวนอนแสดงถึงอุณหภูมิในการเผาลูกบอลเกลือ พบว่าตั้งแต่จุดเริ่มต้นน้ำหนักของลูกบอลเกลือเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ซึ่งอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและลูกบอลเกลือที่มีน้ำ และโพลีเอทิลีนไกลคอลในโครงสร้างจนกระทั่งเมื่อความร้อนสูงขึ้นถึง 200°C น้ำหนักของลูกบอลเกลือจะลดลงไปประมาณ 11% และหลังจากนั้นน้ำหนักก็คงที่ไปจนถึงอุณหภูมิ 750°C ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป

ตัวอย่างลูกบอลเกลือที่เผาผนึกแล้วกับอะลูมิเนียมที่ถูกขึ้นรูปด้วยการอัด ถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ผลการทดสอบแสดงว่าชิ้นงานทดสอบมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ประมาณ 1% จากน้ำหนักเริ่มต้น จนเกือบเป็นระนาบ ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมและแก๊สออกซิเจน ในบรรยากาศ



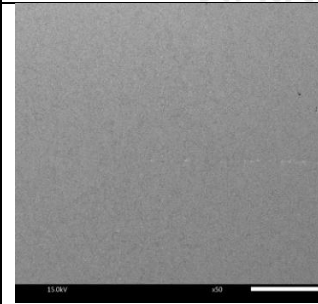
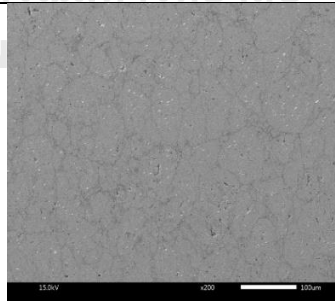
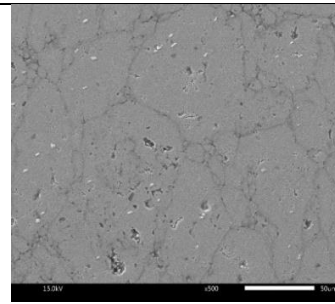
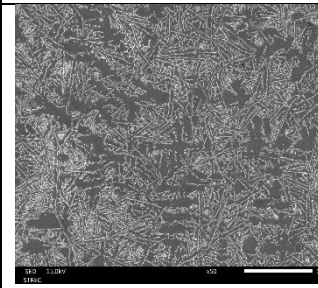
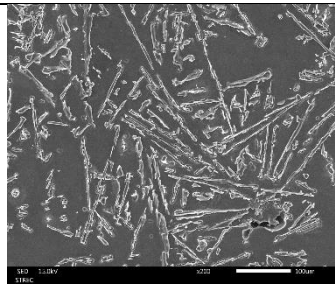
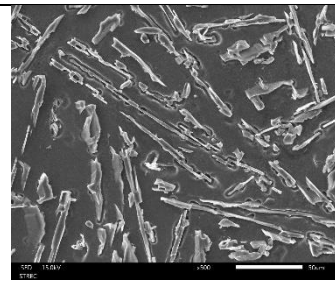
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือที่เผาผนึกแล้วและอะลูมิเนียม ด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป

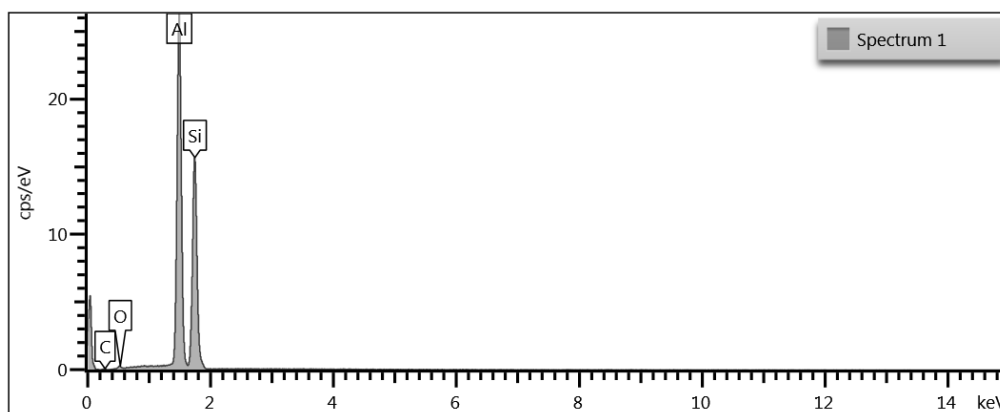
4.3 โครงสร้างของชิ้นงานโพลิอะลูมิเนียม

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อพื้นโพลิอะลูมิเนียม

หลังจากตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโพลิอะลูมิเนียมที่ถูกผลิตขึ้นด้วยวิธีอัดขึ้นรูป และวิธีการหล่อขึ้นรูปพบว่า ชิ้นงานที่เกิดจากการอัดขึ้นรูป เนื้อพื้นอะลูมิเนียมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และสามารถสังเกตเห็นขอบเกรนได้บ้างซึ่งไม่พบอนุภาคหรือโครงสร้างอื่นนอกจากเนื้ออะลูมิเนียม ดังตารางที่ 4.4 ในขณะที่ชิ้นงานโพลิอะลูมิเนียมที่หล่อขึ้นรูปสังเกตเห็นโครงสร้างที่มีลักษณะแพร่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยปฏิสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีหรือธาตุ (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) ในบริเวณที่มีส่วนที่เป็นแพร่กระจายอยู่ พบว่ามีซิลิกอน (Si) อยู่ประมาณ 48% ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC 12 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งโครงสร้างของอะลูมิเนียมที่มีซิลิกอน 10% เมื่อหลอมเหลวแล้วเย็นตัวลงมาจะอยู่ในช่วง ยุ่เทคติดตามเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมชนิดนี้จะมีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียม และมีโครงสร้างซิลิกอนกระจายตัวอยู่ทั่วโครงสร้าง

ตารางที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวชิ้นงานโพลิอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปและหล่อขึ้นรูป

	50x	200x	500x
ชิ้นงานโพลิอะลูมิเนียมอัดขึ้นรูป			
ชิ้นงานโพลิอะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป			



รูปที่ 4.7 การตรวจสอบองค์ประกอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยปฏิสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)

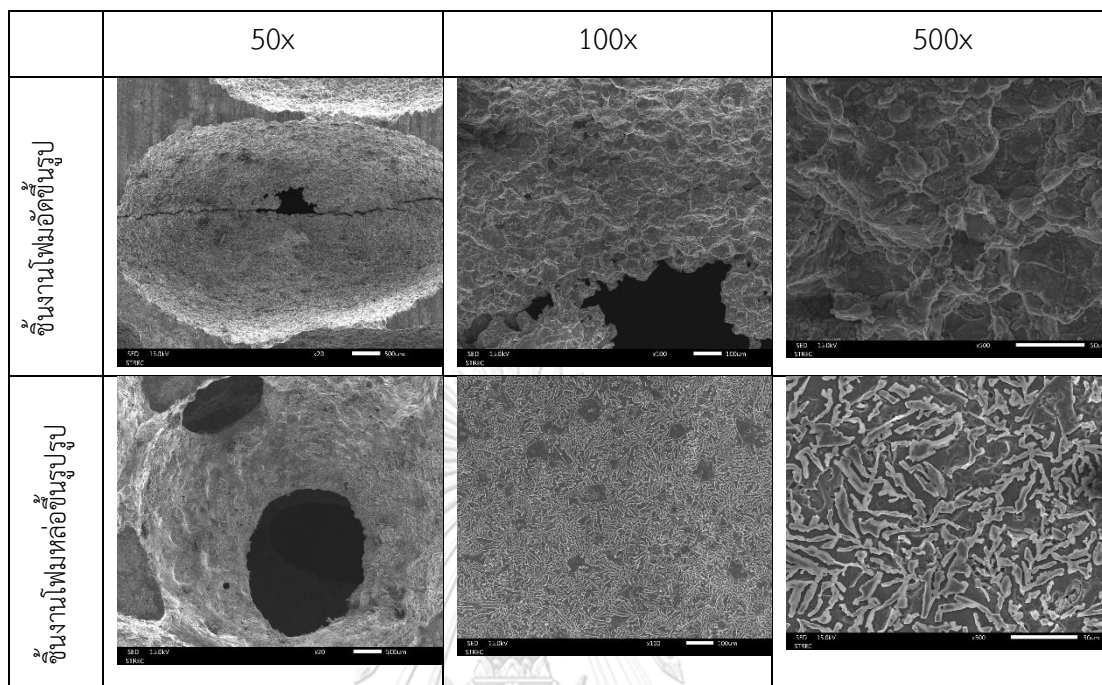
ตารางที่ 4.5 ส่วนผสมของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC 12

Alloy	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb
ADC12	2.1%	10.6%	0.23%	0.7%	0.78%	0.16%	-	0.03%	-

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของรูพรุนโฟมอะลูมิเนียม

เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรูพรุนของโฟมอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูปที่กำลังขยาย 50 เท่าพบว่าลักษณะรูพรุนมีรูปร่างเป็นวงรี ตารางที่ 4.6 เนื่องจากชิ้นงานที่มีลูกบอลเกลืออยู่ภายในได้รับแรงอัดจนทำให้รูปร่างลูกบอลเกลือเปลี่ยนเป็นวงรี นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นรอยแตกเป็นแนวยาวในบริเวณรูพรุนทุกรูพรุนของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาพื้นผิวภายในรูพรุนพบว่ามีความเป็นผิวขรุขระ และไม่เห็นโครงสร้างอื่นเจือปนนอกจากเนื้ออะลูมิเนียม ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตด้วยการหล่อขึ้นรูปที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่าลักษณะรูพรุนเป็นวงกลม ภายในผนังด้านในของรูพรุนเชื่อมต่ออยู่กับรูพรุนที่อยู่ติดลงไป เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า พบว่าบางจุดมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับเนื้ออะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรูพรุนขึ้นงานโพลิอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปและหล่อขึ้นรูป



4.3.3 โครงสร้างมหภาคของโพลิอะลูมิเนียมภายนอกหลังทำการแทรกซึม

โพลิอะลูมิเนียมที่ผ่านการหลอมขึ้นรูปจากแบบรูปร่างทรงกระบอก ใช้อุณหภูมิในการหลอม 650 และ 700°C ใช้ระยะเวลา 10 และ 30 นาที และใช้ความดัน 1 และ 2 bar ถูกนำมาตัดส่วนบนของชิ้นงานออก และถูกนำไปกำจัดลูกบอลเกลือที่อยู่ภายในโครงสร้างโพลิออก ด้วยการละลายในน้ำ พบว่าลักษณะโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานมีความแตกต่างกันเมื่อเปลี่ยน อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการหลอมขึ้นงาน เมื่อหลอมขึ้นงานโดยใช้เวลา 10 นาที และใช้ความดัน 1 bar พบว่าการใช้ อุณหภูมิ 650°C ทำให้ชิ้นงานมีช่องว่างภายในโครงสร้างเชื่อมต่อกัน แต่ลักษณะของเป็นโพรงที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม เนื้ออะลูมิเนียมบางจุดเป็นโพรงกว้าง บางจุดเป็นโพรงขนาดเล็กเท่าลูกบอลเกลือปกติ นอกจากนี้ผิวของชิ้นงานบางจุดไม่เรียบเนียน สามารถสังเกตเห็นเป็นคลื่น ดังรูปที่ 4.5 แต่ไม่พบลูกบอลเกลือตกค้างอยู่ภายใน ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C ชิ้นงานมีโครงสร้างรูพรุนที่เป็นรูปร่างทรงกลมตามรูปร่างของลูกบอลเกลือ มีเพียงบางจุดที่มีรูปร่างบิดเบี้ยวเล็กน้อย จนไม่เป็นรูปร่างทรงกลม เนื้ออะลูมิเนียมเต็มแบบหล่อ ผิวของชิ้นงานเรียบไม่เป็นคลื่น ดังรูปที่ 4.5 เมื่อเพิ่มความดันในการผลิตชิ้นงานเป็น 2 bar พบว่าทั้งชิ้นงานที่หล่อด้วยอุณหภูมิ 650 และ 700°C ส่วนใหญ่มีช่องว่างภายใน

โครงสร้างเชื่อมต่อกัน แต่ลักษณะของช่องว่างเป็นโพรงที่มีรูปร่างไม่แน่นอนคล้าย การหลอมที่ความดัน 1 bar แต่มีเนื้ออะลูมิเนียมเต็มแบบหล่อสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานมากกว่า ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงโครงสร้างมหภาคของโพมอะลูมิเนียมหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที

ระยะเวลา (นาที)	ความดัน (bar)	อุณหภูมิ 650°C	อุณหภูมิ 700°C
10	1	 	 



เมื่อหลอมชิ้นงานโดยใช้เวลา 30 นาที และใช้ความดัน 1 bar พบว่าที่อุณหภูมิ 650°C ชิ้นงานมีโครงสร้างช่องว่างภายในเป็นโพรงที่เชื่อมต่อกัน รูปทรงช่องว่างเป็นรูปร่างเดียวกับลูกบอลเกลือเกือบทั้งหมด รูพรุนภายในชิ้นงานเชื่อมต่อกัน เนื้ออะลูมิเนียมกระจายทั่วชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอมากกว่าชิ้นงานที่หล่อโดยใช้เวลา 10 นาที แต่บางจุดของชิ้นงานยังมีเนื้ออะลูมิเนียมไม่เต็มอยู่เล็กน้อย นอกจากนี้ เนื้ออะลูมิเนียมมีลักษณะเป็นคลื่นน้อยลง ดังตารางที่ 4.8 ในขณะที่ชิ้นงานที่หล่อที่อุณหภูมิ 700°C มีโครงสร้างช่องว่างภายในเป็นโพรงที่เชื่อมต่อกันดี รูปทรงช่องว่างเป็นรูปร่างเดียวกับลูกบอลเกลือ เนื้ออะลูมิเนียมเต็มเต็มแบบหล่ออย่างสม่ำเสมอมากกว่าชิ้นงานที่หล่อด้วยอุณหภูมิ 650°C ดังตารางที่ 4.7 แต่เนื่องจากชิ้นงานมีเนื้ออะลูมิเนียมทั่วชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ทำให้สังเกตลักษณะการเชื่อมต่อของรูพรุนภายในโครงสร้างได้ยาก เมื่อเพิ่มความดันในการผลิตชิ้นงานเป็น 2 bar ก็ได้ชิ้นงานที่มีเนื้ออะลูมิเนียมเต็มชิ้นงานเช่นเดียวกัน

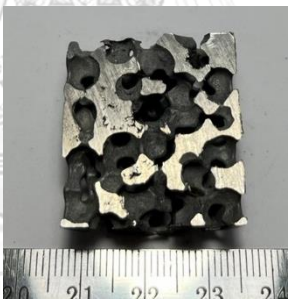
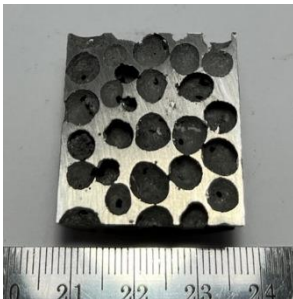
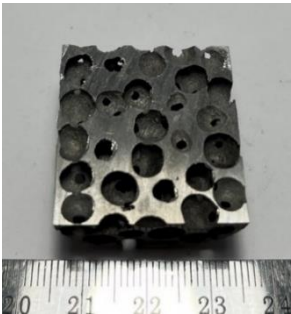

ตารางที่ 4.8 แสดงโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที

ระยะเวลา (นาทื)	ความดัน (Bar)	อุณหภูมิ 650°C	อุณหภูมิ 700°C
30	1	 	 
	2	 	 

4.3.4 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมภายในหลังการหล่อ


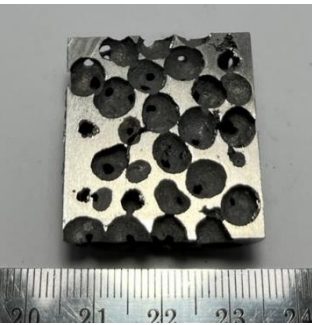
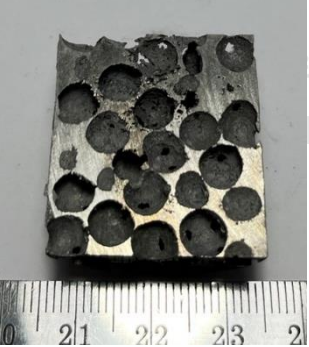
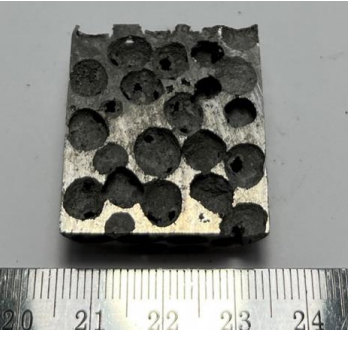
ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อแต่ละอุณหภูมิ เวลา และความดันถูกนำมาตัดผ่าครึ่งเพื่อตรวจสอบโครงสร้างภายใน พบว่าชิ้นงานที่หล่อเป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิ 650°C ที่ความดัน 1 bar พบว่าชิ้นงานมีโครงสร้างรูพรุนภายในเชื่อมต่อกัน แต่ในบางจุดรูทรงของรูพรุนไม่สมบูรณ์แบบ อีกทั้งบางจุดมีเนื้ออะลูมิเนียมและรูพรุนกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังตารางที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมอื่น ๆ ที่หลอมด้วยเวลา 10 นาที พบว่าชิ้นงานมีรูพรุนที่เป็นรูปร่างกลมกว่า ชิ้นงานที่หลอมด้วยอุณหภูมิ 650°C ดังตารางที่ 4.9 อีกทั้งมีเนื้ออะลูมิเนียมเต็มทั่วทั้งชิ้นงานมากกว่า

ตารางที่ 4.9 แสดงโครงสร้างมหภาคภายในของโฟมอะลูมิเนียมหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที

ระยะเวลา (นาที)	ความดัน (Bar)	อุณหภูมิ 650°C	อุณหภูมิ 700°C
10	1		
	2		

เมื่อเพิ่มเวลาในการหล่อเป็น 30 นาที พบว่าชิ้นงานที่หล่อด้วยอุณหภูมิ 650 และ 700 °C ที่ความดัน 1 และ 2 bar มีโครงสร้างรูพรุนภายในเชื่อมต่อกัน ซึ่งลักษณะรูพรุนเป็นทรงกลม โครงสร้างรูพรุนเชื่อมต่อกัน และเนื้ออะลูมิเนียมเต็มเต็มแบบดีกว่าชิ้นงานที่หล่อที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 10 นาที ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงโครงสร้างมหภาคภายในของโฟมอะลูมิเนียมหลังการหลอมโดยใช้เวลาหลอม 10 นาที

ระยะเวลา (นาที)	ความดัน (Bar)	อุณหภูมิ 650°C	อุณหภูมิ 700°C
30	1		
	2		

4.3.5 ผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลาต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมถูกนำมาคำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ โดยใช้สูตรหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ ดังสูตรที่ 3.3 ได้ผลความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

ระยะเวลาหลอม (min)	ความดัน (bar)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)	
		อุณหภูมิ 650°C	อุณหภูมิ 700°C
10	1	35.89	36.69
	2	38.22	38.29
30	1	36.65	37.89
	2	38.21	37.03

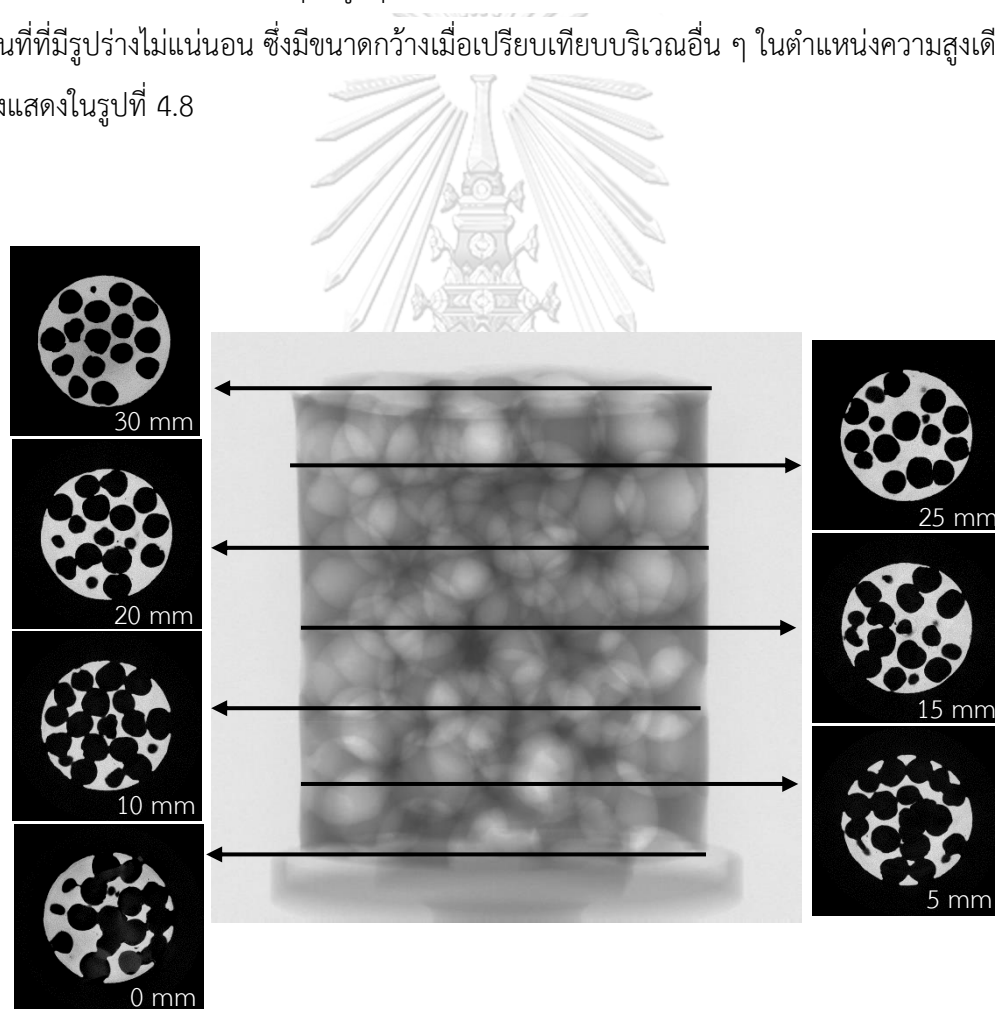
ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์มากที่สุดคือ ชิ้นงานที่หลอมอุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 10 นาที และใช้ความดัน 2 bar โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์คือ 38.29% ชิ้นงานโฟมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์น้อยที่สุดคือ ชิ้นงานที่หลอมอุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 10 นาที และใช้ความดัน 1 bar โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์คือ 35.89% เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 650°C พบว่าชิ้นงานจะมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันจาก 1 เป็น 2 bar ในขณะที่เมื่อเพิ่มเวลาหลอม ชิ้นงานจะมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 700°C พบว่าชิ้นงานส่วนใหญ่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน

4.3.6 การทดสอบโครงสร้างภายในด้วยไมโครซีที

ผลการทดสอบโครงสร้างภายในของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ถูกละลายด้วยเครื่องไมโครซีที ทำให้ทราบลักษณะโครงสร้างภายในของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่เป็นรูปทรงที่ไม่สามารถมองเห็นจากภายนอกได้ ซึ่งพบว่าโครงสร้างภายในของชิ้นงานที่นำมาทดสอบทุกชิ้นไม่พบส่วนที่ทึบแสงและมีรูปร่างทรงกลมที่สื่อถึงการตกค้างของลูกบอลเกล็ดภายในชิ้นงานอยู่เลย

4.3.6.1 ชิ้นงานที่หลอมที่อุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที

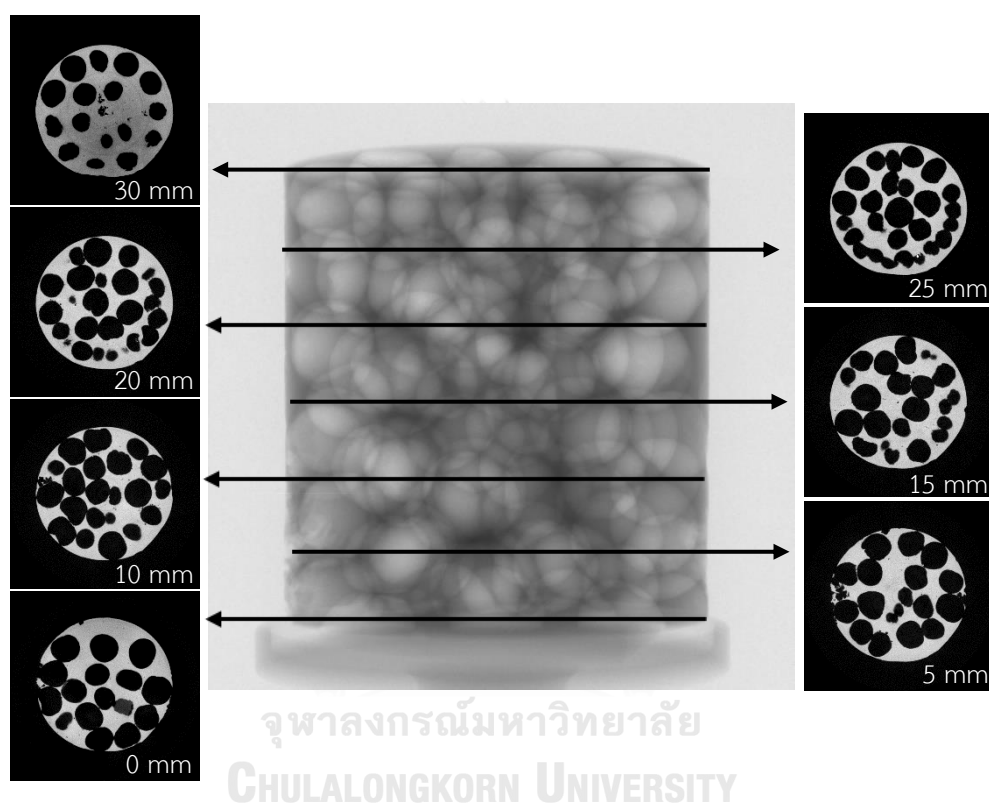
เมื่อดูจากมุมมองในแต่ละตำแหน่งความสูงของชิ้นงานพบว่า ในตำแหน่งที่ 0 และ 5 mm จากด้านล่างของชิ้นงาน บางจุดมีรูปทรงที่ไม่เป็นวงกลมแยกกันอย่างชัดเจน แต่กลับรวมกันจนเป็นพื้นที่ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งมีขนาดกว้างเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ในตำแหน่งความสูงเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที

4.3.6.2 ชิ้นงานโคมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 2 bar เวลา 10 นาที

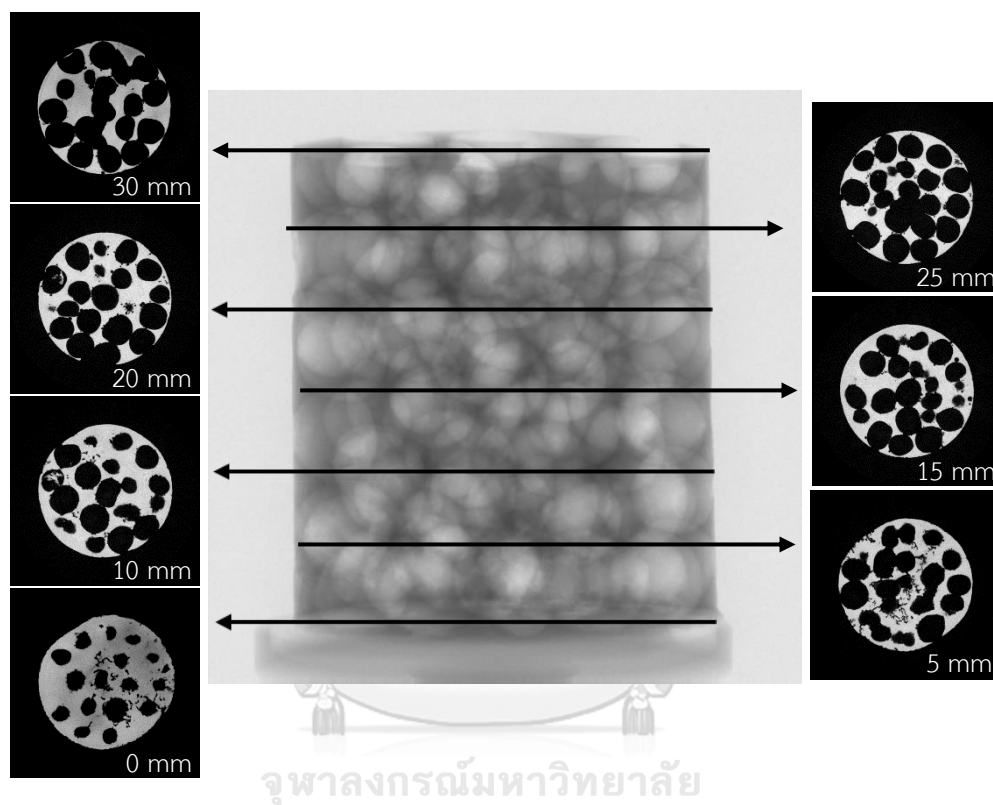
มีลักษณะโครงสร้างภายในที่มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานมากกว่าชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar และไม่พบส่วนที่เป็นช่องว่างขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.9 แต่บางจุดที่ควรจะมีช่องว่างอย่างเช่น ในตำแหน่งที่ 5 และ 15 mm กลับเป็นเนื้ออะลูมิเนียมที่หนากว่าปกติ แต่ไม่เท่าชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar



รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 2 bar เวลา 10 นาที

4.3.6.3 ชิ้นงานโคมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C แรงดัน 1 bar เวลา 30 นาที

มีจุดที่รูพรุนรวมกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ 1 จุด คือบริเวณความสูงชิ้นงาน 25 mm แต่ไม่มากเท่าชิ้นงานที่หลอมที่อุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที และยังพบเนื้ออะลูมิเนียมที่ไม่เป็นช่องว่างอยู่บางจุด ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างภายในของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C แรงดัน 1 bar เวลา 30 นาที

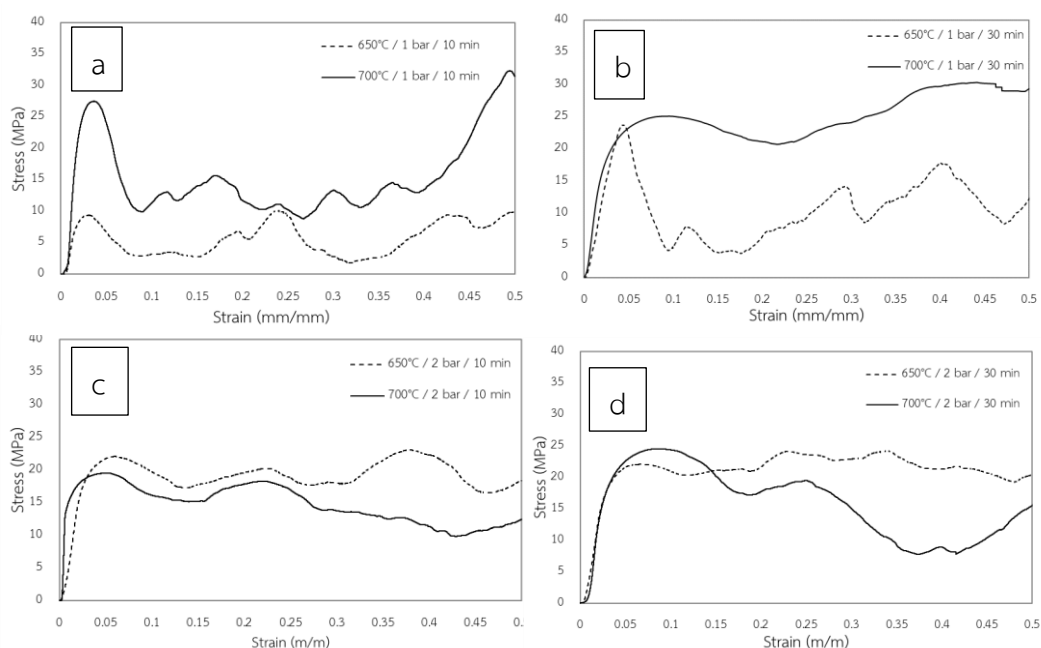
4.4 สมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

4.4.1 การทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

เมื่อนำชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อมาทดสอบสมบัติทางกลโดยการทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงอัด (Compression) ผ่านเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) จากนั้นนำข้อมูลแรงอัดและระยะในการอัดมาคำนวณเป็นค่าความเค้น (Stress) ซึ่งเป็นค่าแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน และค่าความเครียด (Strain) ซึ่งเป็นค่าระยะการอัดต่อความสูงของชิ้นงาน แล้วนำมาวาดเป็นกราฟ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11 – 4.13

4.4.1.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่างกัน

ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตขึ้นด้วยอุณหภูมิที่ 650 และ 700°C ถูกนำมาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.12 พบว่า ชิ้นงานที่ผลิตด้วยความดัน 1 bar เวลา 10 นาที a) มีความแตกต่างกันในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) โดยที่ชิ้นงานที่ผลิตที่อุณหภูมิ 700°C มีความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) สูงกว่าชิ้นงานที่ผลิตที่อุณหภูมิ 650°C แต่หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงบริเวณที่ราบ (Plateau stress) พฤติกรรมการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมทั้งคู่ไม่เป็นเส้นตรงในแนวระนาบและไม่คงที่ แต่ขึ้นและลงอย่างไม่มีแบบแผน แต่โดยภาพรวมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน แตกต่างกันที่ความเค้นโดยรวมของชิ้นงาน อุณหภูมิ 700°C ในขณะที่ชิ้นงานที่ผลิตด้วยความดัน 1 bar เวลา 30 นาที b) ช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรงของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตที่อุณหภูมิ 650°C มีความแข็งแรงจุดครากใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงบริเวณที่ราบ พฤติกรรมการรับแรงอัดชิ้นงานทั้งสองแตกต่างกันอย่างชัดเจน กราฟของชิ้นงาน 650°C ขึ้นลงอย่างไม่มีแบบแผน แต่กราฟของชิ้นงาน 700°C มีลักษณะเป็นระนาบและอยู่ในช่วงค่าความเค้นสูงกว่าชิ้นงาน 650°C ในขณะที่ชิ้นงานที่ผลิตด้วยแรงดัน 2 bar เวลา 10 c) ผลการรับแรงอัดของชิ้นงานทั้งคู่มีพฤติกรรมคล้ายกัน โดยที่ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650°C มีความเค้นสูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่ชิ้นงานที่ผลิตด้วยแรงดัน 2 bar เวลา 30 นาที ทั้งชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650 และ 700°C มีช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรงคล้ายกันมาก แต่ความเค้นของชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar ต่ำกว่าในช่วงบริเวณที่ราบ ดังรูปที่ 4.12

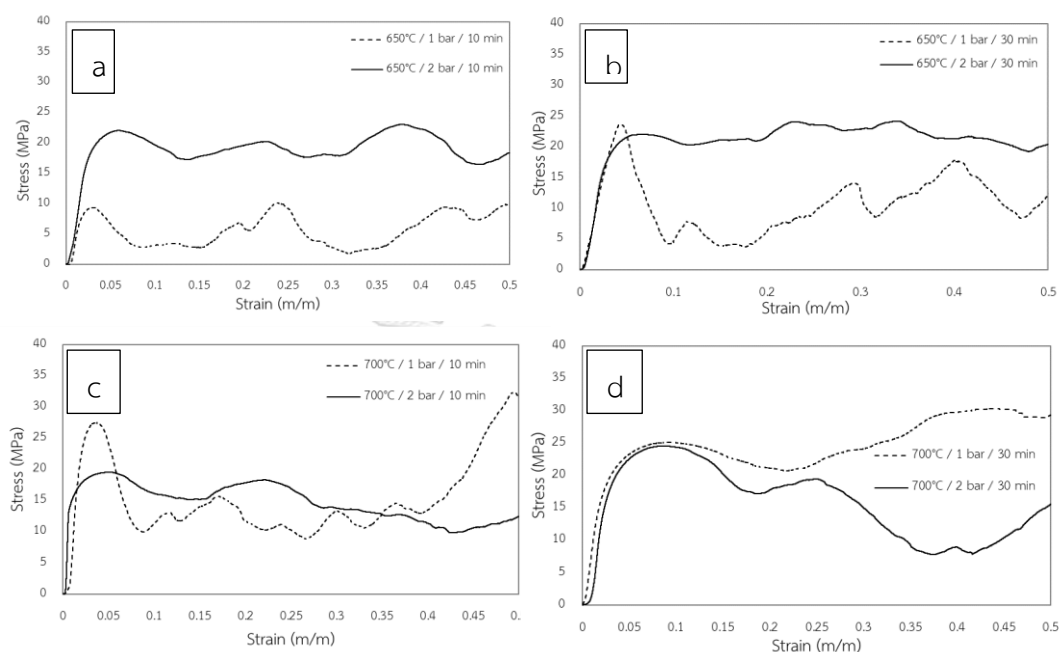


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดที่ได้รับแรงอัดของชิ้นงานโพลีเอไมด์ที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่างกัน a) อุณหภูมิ 650 และ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที b) อุณหภูมิ 650 และ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที c) อุณหภูมิ 650 และ 700 °C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที d) อุณหภูมิ 650 และ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที

4.4.1.2 พฤติกรรมการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ผลิตด้วยแรงดันต่างกัน

ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานงานโพลีเอไมด์ที่ผลิตขึ้นด้วยแรงดัน 1 และ 2 bar ถูกนำมาเปรียบเทียบกับดังรูปที่ 4.13 พบว่า ชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650 เวลา 10 นาที a) มีลักษณะกราฟคล้ายกัน ทั้งช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรงและช่วงบริเวณที่ราบ เพียงแต่ชิ้นงานโพลีที่ผลิตด้วยแรงดัน 2 bar จะมีค่าความเค้นสูงกว่าทุกระยะที่อัด ในขณะที่เมื่อใช้เวลาในการหลอมชิ้นงานเปลี่ยนเป็น 30 นาที b) พบว่ากราฟของชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar มีลักษณะแตกต่างจากชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar ในบริเวณที่เปลี่ยนจากการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรงเป็นช่วงบริเวณที่ราบ โดยที่ความเค้นของชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar ตกลงอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ช่วงบริเวณที่ราบและค่าความเค้นขึ้นและลงอย่างไม่มีแบบแผนในช่วงนี้อีกด้วย ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar มีค่าความเค้นสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar ในช่วงบริเวณที่ราบทุกระยะที่อัด เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C เวลา 10 นาที c) พบว่ากราฟของชิ้นงานที่หลอม 10 นาทีจะค่า

ความเค้นใกล้เคียงกัน และชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 700°C เวลา 30 นาที ชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar จะมีค่าความเค้นต่ำกว่าชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar ในช่วงบริเวณที่ราบ ดังรูปที่ 4.13

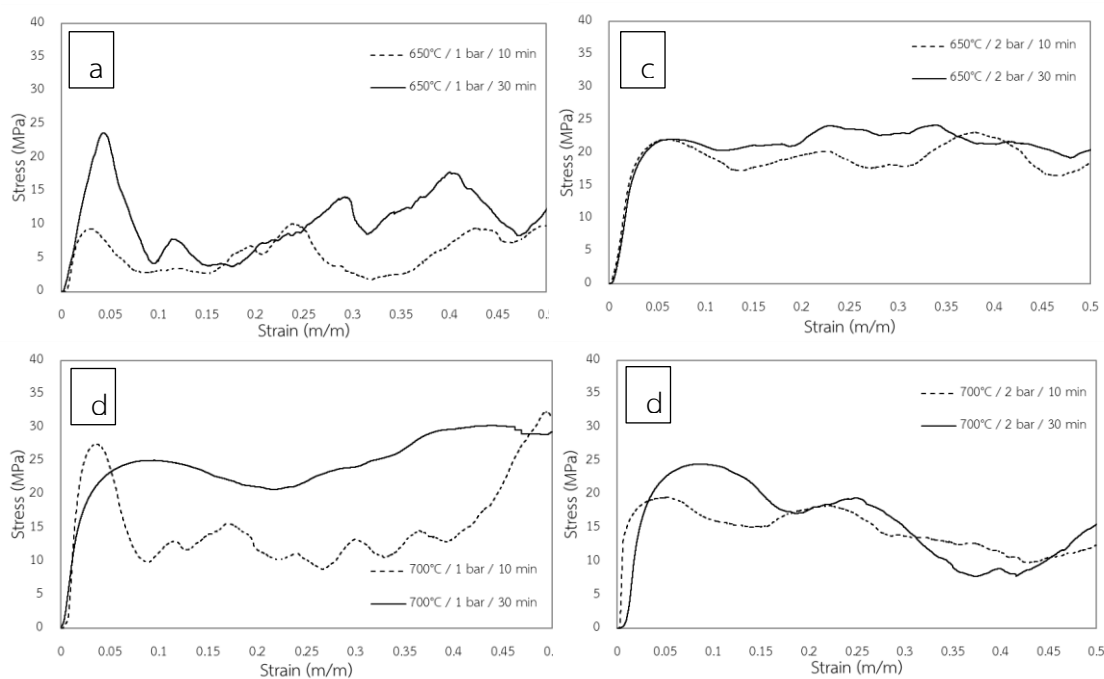


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดที่ได้รับแรงอัดของชิ้นงานโพลีอิมิดีนีเยมที่ผลิตด้วยเวลาต่างกัน a) อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที b) อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที c) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที d) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 30 นาที

4.4.1.3 พฤติกรรมการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ผลิตด้วยระยะเวลาหลอมต่างกัน

ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโพลีอิมิดีนีเยมที่ผลิตขึ้นด้วยเวลาหลอม 10 และ 30 นาที ถูกนำมาเปรียบเทียบบ้างดังรูปที่ 4.14 พบว่า ชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar a) ชิ้นงานทั้งสองมีพฤติกรรมในการรับแรงอัดคล้ายกัน ซึ่งชิ้นงานที่หลอมเวลา 10 นาที มีความเค้นสูงกว่าเล็กน้อยในบางจุด เช่นเดียวกับชิ้นงานผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar b) และชิ้นงานผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C แรงดัน 2 bar d) ในขณะที่ชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C แรงดัน 1 bar c) พบว่าพฤติกรรมการรับแรงอัดต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรงและช่วงบริเวณที่ราบ โดยที่เมื่อใช้เวลาหลอม 30 นาที ชิ้นงานจะมีความเค้นสูง

กว่าแทบทุกระยะการกด ในขณะที่ชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 2 bar b) แม้ใช้เวลาในการหลอม 10 และ 30 นาที แต่ลักษณะกราฟคล้ายกัน แต่ชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 30 นาที มีค่าความเค้นสูงกว่าชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 10 นาที นอกจากนี้กราฟของชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 700°C แรงดัน 2 bar d) มีลักษณะคล้ายกันเช่นกัน และชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 30 นาที มีค่าความเค้นสูงกว่าชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 10 นาที



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.13 รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความเค้นและความเครียดที่ได้รับแรงอัดของชิ้นงานโพลีอิมิเดียมที่ผลิตด้วยเวลาต่างกัน a) อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที b) อุณหภูมิ 650°C ความดัน 2 bar เวลา 30 นาที c) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที d) อุณหภูมิ 700°C ความดัน 2 bar เวลา 30 นาที

4.4.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากและการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม

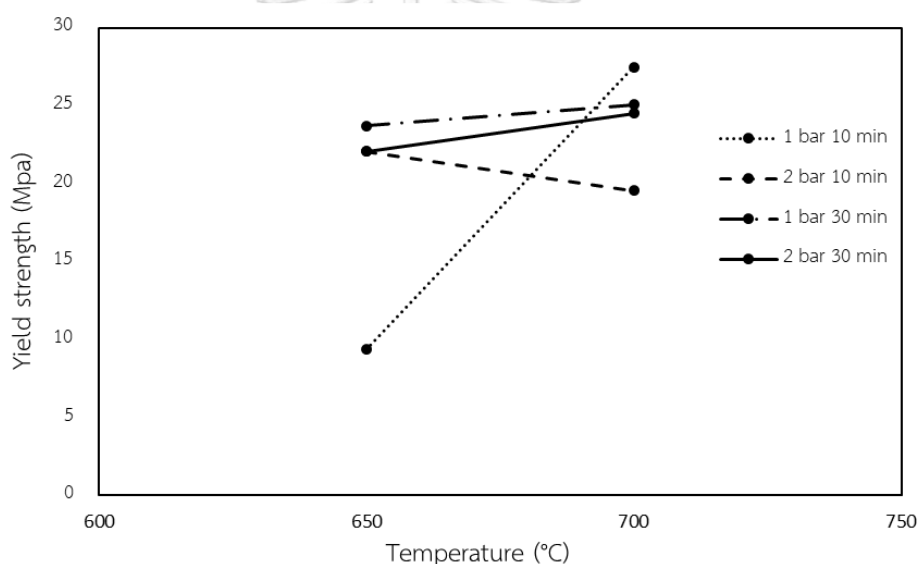
หลังจากทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม แล้วนำข้อมูลจากแรงอัดเปลี่ยนเป็นค่าความเค้น นำข้อมูลจากระยะกดเป็นค่าความเครียด จากนั้นใช้ค่าที่มากที่สุดของความเค้นในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) เพื่อหาความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) และการดูดซับพลังงานของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงอัด (Energy absorption) โดยการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความเค้นและความเครียด ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงในรูปแบบความแข็งแรงจุดคราก และการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	เวลาหลอม (นาท)	Yield strength (MPa)	E ₅₀ (J/cm ³)
650	1	10	9.37	2.78
		30	23.69	5.23
	2	10	22.08	9.45
		30	22.06	10.51
700	1	10	27.48	7.58
		30	25.08	8.75
	2	10	19.54	7.33
		30	24.51	7.81

4.4.2.1 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดคราก

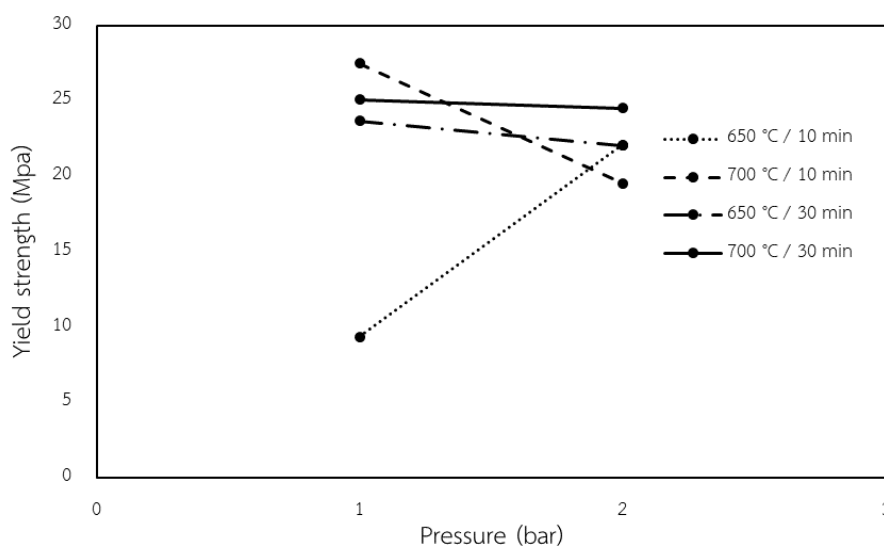
เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650 และ 700°C พบว่าชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตที่อุณหภูมิ 650°C ส่วนใหญ่มีความแข็งแรงจุดครากใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะใช้แรงดันและเวลาหลอมต่างกัน ดังรูปที่ 4.15 โดยมีความแข็งแรงจุดครากอยู่ในช่วง 22.06 – 23.69 MPa ยกเว้นชิ้นงานที่ใช้ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที ที่มีความแข็งแรงจุดครากเพียง 9.37 MPa แต่เมื่อชิ้นงานที่ผลิตโดยใช้อุณหภูมิ 700°C พบว่าความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที ที่มีความแข็งแรงจุดครากเพิ่มขึ้นอย่างมาก ยกเว้นเพียงชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar 10 นาที ที่มีความแข็งแรงจุดครากลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 700°C ดังแสดงในรูป 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงจุดครากเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการผลิตต่างกัน

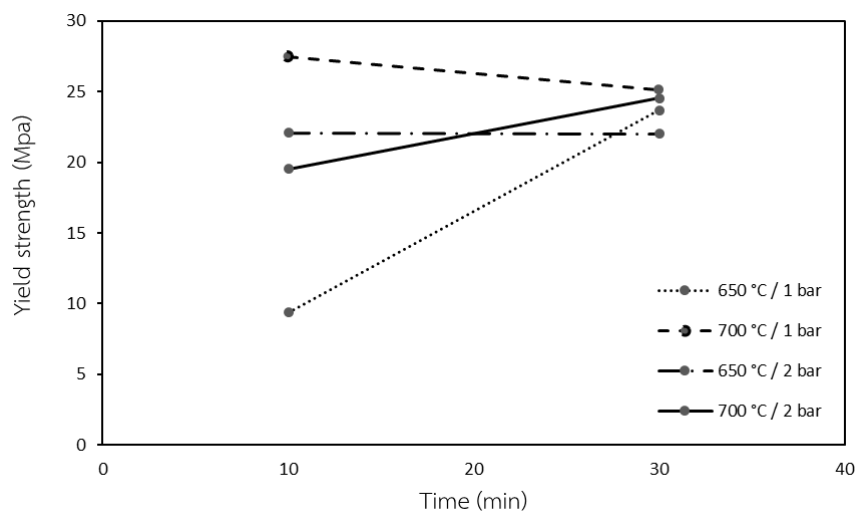
เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยแรงดัน 1 และ 2 bar พบว่าชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยแรงดัน 1 bar ส่วนใหญ่มีความแข็งแรงจุดครากใกล้เคียงกันในช่วง 23.69 - 27.48 MPa และมีความแข็งแรงจุดครากต่างไปจากเดิมเล็กน้อยเมื่อเพิ่มแรงดันจาก 1 เป็น 2 bar ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650°C เวลา 10 นาที ที่มีความแข็งแรงจุด

ครากเพียง 9.37 MPa แต่ความแข็งแรงจุดครากเพิ่มขึ้นไปจนใกล้เคียงกับชิ้นงานอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2 bar ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงจุดครากเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการผลิตต่างกัน

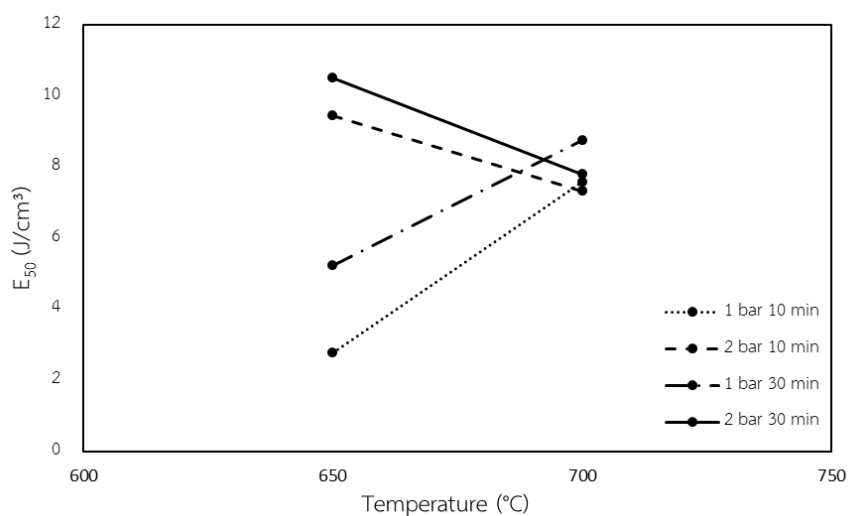
เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโม่อะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยเวลาหลอม 10 และ 30 นาที พบว่าชิ้นงานที่ผลิตด้วยเวลา 10 นาทีมีความแข็งแรงจุดครากที่ต่างกันมากกว่าการใช้อุณหภูมิ 650°C หรือ แรงดัน 1 bar คืออยู่ในช่วง 19.54 – 27.48 MPa ซึ่งชิ้นงานที่ 650°C แรงดัน 1 bar มีความแข็งแรงจุดครากเพียง 9.37 MPa แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการหลอม ความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานบางชิ้นเพิ่มขึ้น บางชิ้นลดลง และบางไม่เปลี่ยนแปลงแต่เข้ามาใกล้เคียงกันในช่วง 22.06 – 25.08 MPa ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงจุดครากของยังเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้เวลาในการผลิตต่างกัน

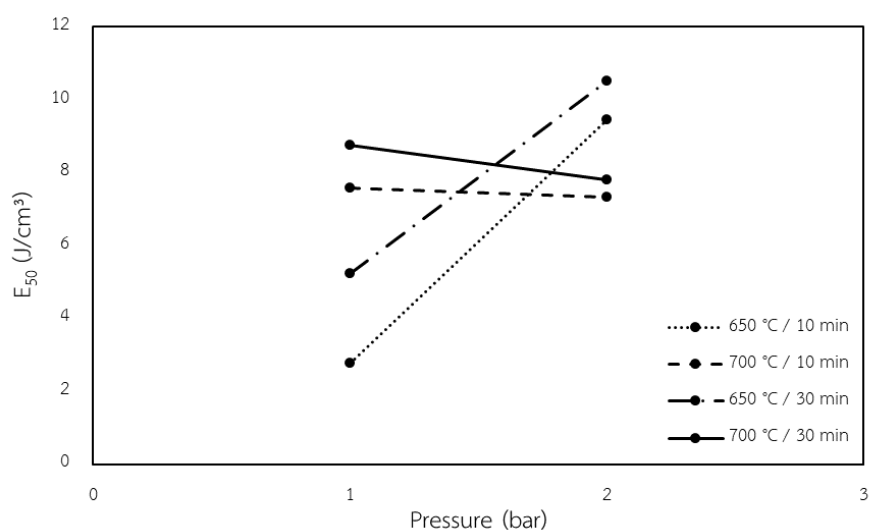
4.4.2.2 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงาน

หลังจากเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650 และ 700°C พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 650°C ชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar โดยใช้เวลาหลอม 10 และ 30 นาที มีค่าการดูดซับพลังงานสูงใกล้เคียงกัน ได้แก่ 9.45 และ 10.51 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C ค่าการดูดซับพลังงานกลับลดลง แต่ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิ 650°C ชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar โดยใช้เวลาหลอม 10 และ 30 นาที มีค่าการดูดซับพลังงานสูงใกล้เคียงกัน ได้แก่ 2.78 และ 5.23 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C ค่าการดูดซับพลังงานกลับเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.16



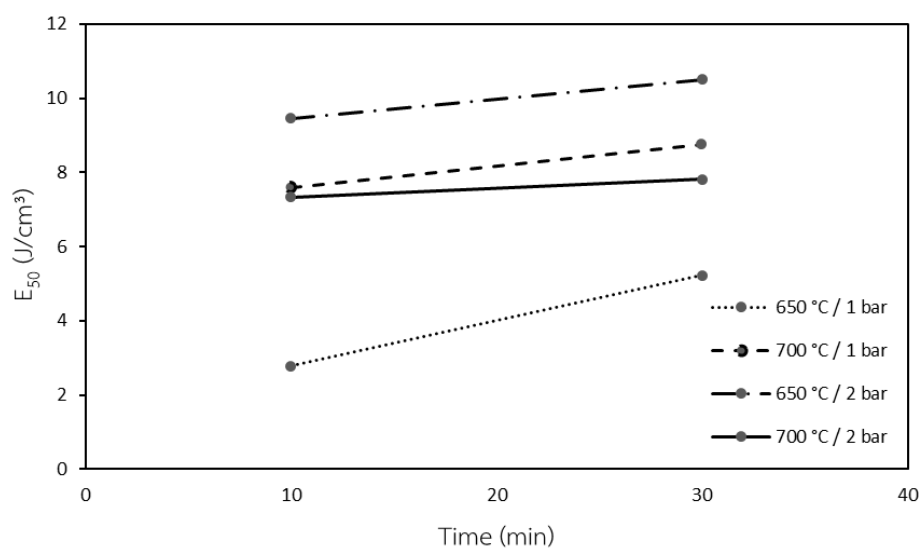
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการผลิตต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 และ 2 bar พบว่าชิ้นงานที่ใช้ อุณหภูมิในการหลอม 650°C มีค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นทั้ง เวลา 10 และ 30 นาที เมื่อเพิ่ม แรงดันจาก 1 เป็น 2 bar ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการหลอม 700°C มีค่าการดูดซับพลังงาน ไกล่เคียงกันเมื่อเพิ่มแรงดันจาก 1 เป็น 2 bar ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการผลิตต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่ใช้เวลา 10 และ 30 นาที พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาหลอมจาก 10 เป็น 30 นาที โดยเฉพาะชิ้นงานที่หลอมด้วยอุณหภูมิ 650°C เวลา 10 นาที ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการผลิตต่างกัน



บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ผลของสมบัติทางกายภาพของเกลื่อ

5.1.1 ผลของขนาดอนุภาคเกลื่อ

จากผลการทดสอบการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของเกลื่อก่อนและหลังการบดลดขนาด ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ที่ความเร็วรอบในการบด 400 รอบต่อนาที อนุภาคเกลื่อจะละเอียดที่สุด นอกจากนี้หากเปรียบเทียบระยะเวลาในการบด 30 45 และ 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที เท่ากัน พบว่าเกลื่อที่บดด้วยระยะเวลา 60 นาที จะละเอียดที่สุด ทั้งนี้การใช้ความเร็วรอบและเวลาในการบดมาก จะทำให้อุณหภูมิของหม้อบดสูงมาก และทำให้การเปิดฝาหม้อบดยากมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ที่ความเร็ว 350 รอบต่อนาที และเวลา 45 นาที เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงต่อการทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ อนุภาคเกลื่อที่มีขนาดเล็กส่งผลให้การขึ้นรูปเป็นลูกบอลเกลื่อง่ายมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากทำให้ตัวเชื่อมประสานสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างอนุภาคได้มากขึ้นส่งผลถึงความเหนียวของเกลื่อหลังการผสมตัวเชื่อมประสานอีกทั้งยังช่วยให้ลูกบอลเกลื่อสามารถคงสภาพเป็นรูปร่างทรงกลมได้ดีมากขึ้นก่อนนำไปเผาผนึก

5.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเกลื่อ

เดิมทีโครงสร้างจุลภาคของเกลื่อมีลักษณะเป็นผลึกคล้ายลูกบาศก์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 หลังจากการบดละเอียด พบว่าขนาดอนุภาคเกลื่อลดลงมาก และมีบางส่วนรูปร่างเปลี่ยนไปเป็นผลึกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ต่างจากเดิมที่เป็นผลึกคล้ายลูกบาศก์ เนื่องจากการบดละเอียด

5.2 สมบัติของลูกบอลเกลือ

5.2.1 ลักษณะของลูกบอลเกลือที่ขึ้นรูปแล้วก่อนและหลังเผา

ลักษณะของลูกบอลเกลือหลังจากการขึ้นรูปเป็นทรงกลม มีลักษณะค่อนข้างกลมและขึ้นรูปได้ง่าย เนื่องจากอนุภาคเกลือมีขนาดเล็กส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ผสมกับตัวเชื่อมประสาน อีกทั้งยังคงรูปร่างเดิมเมื่อปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง เนื่องจากมีสารละลาย PEG เป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อผ่านการเผาไหม้แล้ว ลูกบอลเกลือจะมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นมาก นอกจากนี้ สีของลูกบอลเกลือเปลี่ยนจากสีขาวอมเหลืองเป็นสีขาวบริสุทธิ์มากขึ้นจากเดิมหลังจากการเผาไหม้เนื่องจากสารเจือปน เช่น ผุพัง สลายไปขณะเผาไหม้ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลา (Heating rate) ต้องไม่สูงจนเกินไป เพื่อให้เวลาในการสลายตัวของสารเหล่านี้ ส่งผลให้ลูกบอลเกลือหลังจากเผาไหม้ไม่แตกร้าวจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารเหล่านั้น

5.2.2 ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือ

การเผาไหม้ทำให้ความหนาแน่นของลูกบอลเกลือต่ำลงเนื่องจากทำให้เกิดการสลายตัวของน้ำ สารเติมแต่ง และสารเจือปนต่างๆ ซึ่งพบในลูกบอลเกลือทั้งสามขนาด ซึ่งผลลัพธ์สอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Jinnapat [12] ในแง่ของการเชื่อมประสานกันระหว่างอนุภาคของเกลือที่สังเกตได้จากผิวลูกบอลเกลือ อีกทั้งจากการที่ตัวประสานถูกกำจัดออกไปในขณะเผาไหม้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นที่ลดลงเมื่อลูกบอลเกลือถูกเผาไหม้แล้ว

5.2.3 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของลูกบอลเกลือ

จากผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของลูกบอลเกลือด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ทราบว่าหลังจากการเผาไหม้ พื้นผิวของลูกบอลเกลือเชื่อมประสานกันมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับก่อนเผาไหม้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เผาไหม้คือ 750°C ในขณะที่อุณหภูมิหลอมเหลวของเกลือบริสุทธิ์คือ 800°C ทำให้อนุภาคของเกลือในลูกบอลเกลือเริ่มเกิดการเชื่อมประสานแต่ยังไม่ถึงจุดที่จะเกิดการหลอมเหลว ส่งผลให้อนุภาคเกลือที่ผิวของลูกบอลเกลือเชื่อมติดกันเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนตั้งแต่กำลังขยาย 50 เท่า

5.2.4 ความสามารถในการละลายน้ำของลูกบอลเกลือ

ผลการทดสอบความสามารถในการละลายของลูกบอลเกลือหลังการเผาผนึก แสดงให้เห็นว่า เวลาที่ใช้ในการละลายลูกบอลเกลือจนหมดจะมากขึ้นเมื่อขนาดของลูกบอลเกลือใหญ่ขึ้น โดยเวลา มากที่สุด ซึ่งใช้ในการละลายลูกบอลเกลือที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm คือประมาณ 43-46 นาที ทั้งนี้จากการทดลองเป็นการจับเวลาการละลายของลูกบอลเกลือเพียง 1 เม็ด แต่ในการผลิตโฟม อะลูมิเนียม อาจมีลูกบอลเกลือมากถึง 60 เม็ด อีกทั้งโครงสร้างที่ซับซ้อนของโฟมอะลูมิเนียม อาจทำให้จำเป็นต้องใช้เวลาในการละลายมากขึ้น

5.2.5 ความแข็งแรงของลูกบอลเกลือ

เนื่องจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบนผิวของลูกบอลเกลือทำให้ทราบว่า ผิวและ โครงสร้างของของลูกบอลเกลือเชื่อมประสานกันจนมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ย่อมส่งผลให้ความ แข็งแรงของลูกบอลเกลือสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อศึกษาผลของการทดสอบความแข็งแรงของลูกบอล เกลือโดยการรับแรงอัดในแนวดิ่ง พบว่าลูกบอลเกลือหลังเผาผนึกมีความแข็งแรงสูงกว่าลูกบอลเกลือ ก่อนเผาผนึกทุกขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งความแตกต่างของรูปแบบกราฟที่วัดได้จากการอัด เนื่องจากการที่ทดสอบตัวอย่างลูกบอลเกลือที่มีลักษณะกลมแต่ไม่สมบูรณ์แบบ ดังนั้นแต่ละตัวอย่าง จึงมีรูปแบบกราฟแสดงการรับแรงอัดที่แตกต่างกัน ในช่วงแรกพฤติกรรมการรับแรงอัดของลูกบอล เกลือแสดงออกมาในลักษณะเส้นตรงที่มีความชันมาก เนื่องจากการต้านทานการเปลี่ยนรูป และยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของลูกบอลเกลือมากนัก ต่อมาเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงในบริเวณที่ รวบ คือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้ความเค้นที่ค่อนข้างคงที่ เมื่อถึงจุดหนึ่งที่ลูกบอลเกลือไม่ สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากไปกว่านี้ได้ จะเข้าสู่ช่วงอัดแน่น ซึ่งเป็นช่วงที่ความเค้นเพิ่มขึ้นสูงอย่าง รวดเร็วในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยหลังจากนี้โครงสร้างของลูกบอลเกลือจะแตก ออกเป็นชิ้นขนาดเล็ก ทำให้ความเค้นที่วัดได้ลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามความสูงของกราฟซึ่ง แสดงถึงความสามารถในการรับแรงอัดของลูกบอลเกลือหลังเผาผนึก สูงกว่าลูกบอลเกลือก่อนเผาผนึก อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการที่ความแข็งแรงของลูกบอลเกลือเพิ่มขึ้นหลังเผาผนึกเนื่องจากการหลอมเชื่อม กันของแต่ละอนุภาคเกลือ สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคบนผิวของลูกบอลเกลือหลังเผาผนึกที่เกิด การเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเกลือ

ความแข็งแรงของลูกบอลเกลือหลังเผาผนึกสำคัญอย่างยิ่งต่อการการผลิตโฟมอะลูมิเนียมในขั้นตอนถัดไป เนื่องจากลูกบอลเกลือจะถูกลงในแบบแล้วถูกซ้อนทับด้วยแท่งอะลูมิเนียม ดังนั้นลูกบอลเกลือต้องสามารถทนแรงกดของแท่งอะลูมิเนียมได้ในขณะอยู่ในเตาหลอม

5.2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของลูกบอลเกลือด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป

จากผลการทดสอบการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างลูกบอลเกลือ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 200°C คืออุณหภูมิที่ทำให้ตัวเชื่อมประสานสลายออกจากลูกบอลเกลือเนื่องจากสัดส่วนน้ำหนักที่หายไปใกล้เคียงกับสัดส่วนของสารละลายโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน และเมื่อทดสอบกับชิ้นงานที่ประกอบด้วยลูกบอลเกลือกับอะลูมิเนียมเพื่อจำลองการหลอมชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของลูกบอลเกลือหลังการเผาผนึกไม่มีตัวเชื่อมประสานอยู่ในโครงสร้างแล้ว อีกทั้งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอะลูมิเนียมอีกด้วย

5.3 โครงสร้างของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

5.3.1 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อพื้นโฟมอะลูมิเนียม

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่พบผลึกหรือส่วนประกอบอื่นปะปน เนื่องจากองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และสามารถสังเกตเห็นขอบเกรนได้ ในขณะที่ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อพบผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่งกระอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีหรือธาตุพบว่ามิซิลิกอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก ซึ่งอะลูมิเนียมเกรด ADC 12 มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบมากถึง 10.6% ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งคล้ายกับลักษณะที่ปรากฏบนพื้นผิวชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

5.3.2 โครงสร้างจุลภาคของรูพรุนโฟมอะลูมิเนียม

โครงสร้างจุลภาคของรูพรุนขึ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปมีลักษณะเป็นวงรี เนื่องจากลูกบอลเกลือที่อยู่ในโครงสร้างอะลูมิเนียมที่ได้รับแรงอัดขณะขึ้นรูปเปลี่ยนรูปร่างจากแรงอัดนั้นทำให้เกิดเป็นรูพรุนรูปร่างวงรีเมื่อลูกบอลเกลือถูกกำจัดออก นอกจากนี้ยังพบรอยร้าวบริเวณกลางรูพรุนเนื่องจากการคลายตัวของชิ้นงานหลังการอัดและการขยายตัวเมื่อถูกเผาผนึก อีกทั้งที่รูพรุนมีรูที่เชื่อมต่อระหว่างรูพรุนที่ทำให้สามารถกำจัดลูกบอลเกลือออกจากชิ้นงานได้ และทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างเป็นโฟมที่มีรูพรุนแบบเปิด ในขณะที่รูพรุนขึ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อมีลักษณะเป็นวงกลม เนื่องจากลูกบอลเกลือไม่ได้รับแรงอัดที่รุนแรง ภายในรูพรุนปรากฏรูเชื่อมต่อระหว่างรูพรุนของชิ้นงาน เมื่อใช้กำลังขยายมากขึ้นจะสังเกตเห็นผลึกขนาดเล็กเกาะอยู่ที่บริเวณผนังของรูพรุน ซึ่งอาจเป็นอนุภาคของเกลือที่เคยสัมผัสกับบริเวณรูพรุนขณะหล่อชิ้นงาน

5.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม

โครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมหลังการหล่อด้วยอุณหภูมิ 650°C ใช้ระยะเวลา 10 และใช้ความดัน 1 bar มีเนื้ออะลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งโครงสร้างของชิ้นงานบางจุดเป็นโพรงกว้าง ทั้งที่ควรเป็นรูพรุนขนาดเล็กและมีเนื้ออะลูมิเนียมเป็นโครงสร้างกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ ในขณะที่โครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมชิ้นอื่นมีเนื้ออะลูมิเนียมกระจายสม่ำเสมอมากกว่า เนื่องจากยิ่งอุณหภูมิที่ใช้หลอมสูง ยิ่งส่งผลให้ความหนืดของน้ำอะลูมิเนียมลดลง แม้ว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมเกรด ADC12 อยู่ที่ 600°C ก็ตาม ทั้งนี้ความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวในชิ้นงานที่หลอมด้วยอุณหภูมิ 650°C น้ำอะลูมิเนียมมีความสามารถในการแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างลูกบอลเกลือที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรูพรุนได้ไม่เต็มที่ รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ และแรงดันที่ใช้ ไม่เพียงพอต่อการทำให้น้ำอะลูมิเนียมไหลไปแทนที่ช่องว่างภายในชิ้นงานได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้บางจุดเกิดเป็นโพรงกว้าง และเนื้ออะลูมิเนียมของชิ้นงานกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่อะลูมิเนียมหลอมเหลวของชิ้นงานที่หลอมด้วยอุณหภูมิ 700 °C มีความหนืดต่ำกว่า ทำให้น้ำอะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างลูกบอลเกลือได้ทั่วถึงทั้งชิ้นงานดีกว่าที่อุณหภูมิ 650 °C จึงพบส่วนที่เป็นโพรงกว้างอยู่ไม่มาก ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 นอกจากนี้พบว่าผิวด้านนอกของชิ้นงานแต่ละชิ้น มีลักษณะไม่เรียบเนียน ซึ่งมีสาเหตุมาจากโบรอนไนไตรด์ที่ทาไว้ด้านในของแบบทรงกระบอก เพื่อป้องกันชิ้นงานติดแบบ

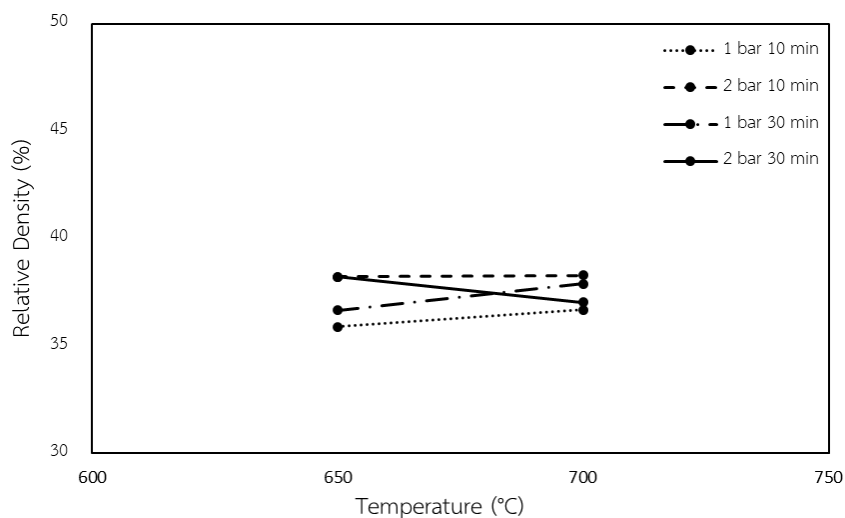
5.3.4 โครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมภายใต้การหล่อ

เมื่อผ่านงานหล่อโครงสร้างภายใน ของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมหล่อด้วยอุณหภูมิ 650°C ใช้ระยะเวลา 10 และใช้ความดัน 1 bar พบรูพรุนเชื่อมต่อกันจนเห็นเป็นโพรงขนาดใหญ่หลายจุด ทำให้แน่ใจว่า ขณะที่ได้รับความร้อน น้ำอะลูมิเนียมไหลเข้าไปในช่องว่างของชิ้นงานได้ไม่ทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้บางจุดเกิดเป็นรูพรุนทั้งที่ควรเป็นเนื้ออะลูมิเนียม ในขณะที่ชิ้นงานอื่นไม่พบรูพรุนที่มีลักษณะดังกล่าว

5.3.5 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพลีอะลูมิเนียม

5.3.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพลีอะลูมิเนียม

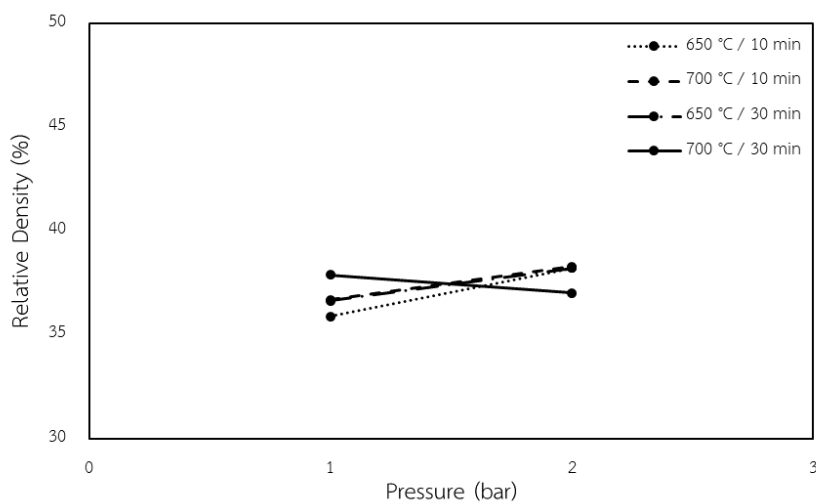
เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้หลอมชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังตารางที่ 4.11 พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพลีอะลูมิเนียมจะสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650°C เล็กน้อย ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นไม่เท่ากันในแต่ละความดันและเวลาที่ใช้ในการผลิต ความหนาแน่นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้อุณหภูมิจาก 650 เป็น 700°C ด้วยชิ้นงานที่มีระยะเวลาหลอม 30 นาที ไม่ว่าจะใช้แรงดัน 1 หรือ 2 bar ดังรูปที่ 5.1 ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิจาก 650 เป็น 700°C ด้วยชิ้นงานที่มีระยะเวลาหลอม 10 นาที ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการหลอมและอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กัน หากใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลานาน จะส่งผลถึงความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้ชัดเจน เนื่องจากน้ำอะลูมิเนียมจะมีความหนืดต่ำและมีเวลาในการไหลเข้าไปในโครงสร้างของชิ้นงานได้ทั่วทุกจุด



รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 10 และ 30 นาที ความดัน 1 และ 2 bar โดยใช้อุณหภูมิ 700 °C

5.3.5.2 ผลของความดันต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม

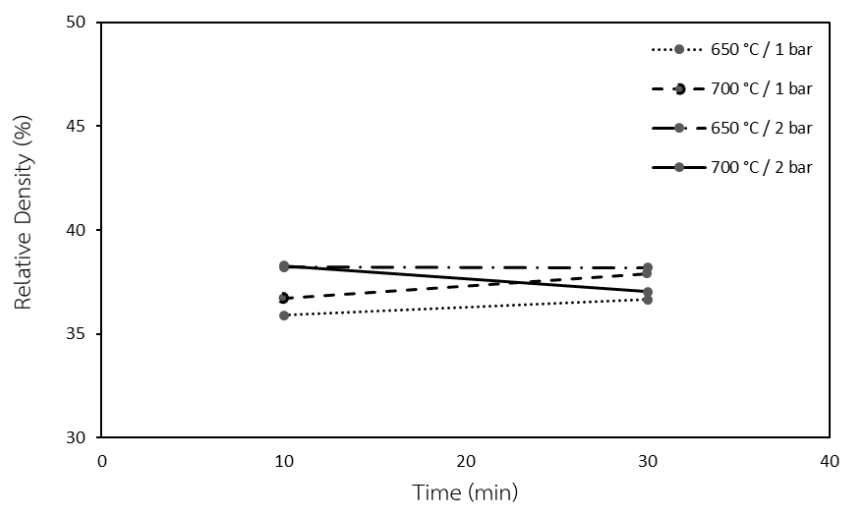
เมื่อเปรียบเทียบความดันที่ใช้หลอมชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังตารางที่ 4.11 พบว่า ความดันมีผลต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงาน จากการหลอมชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันและเวลาเท่ากัน เช่น 650°C เป็นเวลา 10 นาที โดยที่ใช้ความดัน 1 bar และ 2 bar พบว่าชิ้นงานที่หลอมด้วยความดัน 1 bar มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 35.89% ในขณะที่ชิ้นงานหลอมด้วยความดัน 2 bar มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 38.22% ซึ่งต่างกันอยู่ 2.33% หรือเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 10 นาที โดยที่ใช้ความดัน 1 bar และ 2 bar ซึ่งก็ได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 30 นาที พบความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ระหว่างชิ้นงานที่ใช้ความดัน 1 กับ 2 bar เพียงเล็กน้อย เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่ได้รับความร้อนสูง และใช้เวลาในการหลอมมาก ส่งผลให้ผลกระทบจากแรงดันไม่มากเท่าชิ้นงานอื่น หากเปรียบเทียบกับกราฟระหว่างการใช้แรงดัน 1 และ 2 bar พบว่าทุกชิ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้แรงดันเพิ่มขึ้น แต่ชิ้นงาน 700°C เป็นเวลา 30 นาที มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 5.2 เนื่องจากเป็นสถานการณ์ที่ความสามารถในการไหลของน้ำอะลูมิเนียมถึงจุดคงที่



รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่หลอมด้วยแรงดัน 1 และ 2 bar

5.3.5.3 ผลของเวลาต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียม

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้หลอมชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังตารางที่ 4.11 พบว่า ในสถานการณ์เดียวกัน เมื่อเวลาที่ใช้หลอมมากขึ้นจาก 10 เป็น 30 นาที ส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่น ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650°C และแรงดัน 1 bar แต่ความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นมากเมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C ดังรูปที่ 5.3 ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิ 700°C ทำให้น้ำอะลูมิเนียมมีความหนืดต่ำ และหากมีเวลาในการไหลมากยิ่งขึ้นส่งผลให้น้ำอะลูมิเนียมแทรกซึมไปในช่องว่างของโครงสร้างของโฟมได้ดี



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 10 และ 30 นาที

ตารางที่ 5.1 แสดงการส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน

การส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน			
ปัจจัย	ส่งผลให้น้อยลง	ไม่ส่งผล	ส่งผลให้มากขึ้น
เพิ่มอุณหภูมิ			✓
เพิ่มแรงดัน			✓
เพิ่มระยะเวลา			✓

5.3.6 การทดสอบโครงสร้างภายในด้วยไมโครซีที

โครงสร้างของโม่อะลูมิเนียมที่ตรวจสอบด้วยหลักการถ่ายภาพรังสีเอกซ์เรย์ด้วยคอมพิวเตอร์ (X-ray Computerized Tomography Scan) โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพชิ้นงานโม่ด้วยรังสีเอกซ์เรย์ แล้วอาศัยคอมพิวเตอร์ประมวลผลเพื่อสร้างภาพสามมิติ ทำให้สามารถมองเห็นภาพลักษณะทั้งภายในและภายนอกของชิ้นงานได้ พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีรูพรุนด้านในเป็นทรงกลมกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.8-4.11 เนื่องจากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เรย์จะสามารถแยกวัตถุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้ด้วยความเข้มของสี ซึ่งโครงสร้างที่เป็นทรงกลมกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานมีสีเทาโปร่งแสง ในขณะที่โครงสร้างสีเทาทึบแสงที่แสดงถึงเนื้ออะลูมิเนียมก็กระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงานเช่นกัน ทำให้ทราบว่าโครงสร้างภายในของชิ้นงานไม่มีลูกบอลเกลือก้างอยู่ เพราะหากยังคงมีลูกบอลเกลือก้างอยู่ต้องมีส่วนทึบแสงที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมปรากฏอยู่ในภาพ เนื่องจากเกลือก้างมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของชิ้นงานโม่อะลูมิเนียมที่ใช้อุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที กับชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar พบว่า ชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 1 bar มีจุดที่เป็นรูพรุนขนาดใหญ่ที่เกิดจากการรวมตัวกันของรูพรุน โดยที่เนื้ออะลูมิเนียมแทรกซึมเข้าไปไม่ถึงในบางจุด ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างมหภาคและความหนาแน่นของโม่อะลูมิเนียมชิ้นนี้ ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar ไม่พบกรณีดังกล่าว

เมื่อพิจารณา โครงสร้างภายในของชิ้นงานโม่อะลูมิเนียมที่ใช้อุณหภูมิ 700°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที กับชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar พบว่ากระจายตัวของรูพรุนภายในชิ้นงานคล้ายกัน เพียงแต่ชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar มีการกระจายตัวของรูพรุนมากกว่าเล็กน้อย

5.4 สมบัติทางกลของชิ้นงานโม่อะลูมิเนียม

5.4.1 การทดสอบการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียม

ในทางทฤษฎี พฤติกรรมการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียมจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยเป็นการแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงรูปภายใต้แรงอัด 3 ขั้นตอนคือ การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) การผิดรูปในบริเวณที่ราบ (Plateau stress level) และช่วงอัดแน่น (Densification) ซึ่งในช่วงแรกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลง

แบบเส้นตรงและเกิดในช่วงระยะสั้น ๆ เนื่องจากความแข็งแรงของเนื้ออะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อให้แรงเกินจากความแข็งแรงจุดคราก ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมจะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงในช่วงบริเวณที่ราบ คือช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายใต้ความเค้นคงที่ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของโฟมอะลูมิเนียม เนื่องจากโครงสร้างภายในของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมเป็นรูพรุน หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงอัดแน่น ซึ่งเป็นช่วงที่ความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นแบบคงที่ เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนอัดแน่นมาแนบกันจนหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ ลักษณะรูปร่าง การกระจายตัว และขนาดของรูพรุนด้วย

5.4.1.1 ผลของอุณหภูมิในการหลอมต่อพฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

พฤติกรรมในการรับแรงอัดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง ของชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิหลอม 650 กับ 700°C แตกต่างกันเมื่อใช้ความดัน 1 bar เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650 และ 700°C เวลา 10 นาที ดังรูปที่ 4.12 a) พบว่าชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 700°C มีช่วงความเค้นสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650°C เช่นเดียวกับการเพิ่มเวลาในการหลอมเป็น 30 นาที ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 700°C มีค่าความเค้นสูงกว่าในช่วงนี้ เนื่องจากการใช้ความดัน 1 bar อาจส่งผลให้บางจุดของชิ้นงานมีเนื้ออะลูมิเนียมหนากว่าบางจุด ต่อมาในช่วงบริเวณที่ราบ ที่ความดัน 1 bar เวลา 10 นาที พฤติกรรมการรับแรงอัดของชิ้นงาน ที่ใช้อุณหภูมิ 650°C กับ 700°C พฤติกรรมใกล้เคียงกัน ในขณะที่ชิ้นงานที่หลอมด้วยเวลา 30 นาที เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C จะมีค่าความเค้นสูงกว่า ชิ้นงาน 650°C ในช่วงบริเวณที่ราบ ทำให้เห็นว่า หากมีเวลามากพอ อุณหภูมิ 700°C สามารถทำให้ชิ้นงานมีเนื้ออะลูมิเนียมที่กระจายตัวอย่างทั่วถึงมากกว่าอุณหภูมิ 650°C จนทำให้ชิ้นงานมีพฤติกรรมในการรับแรงอัดดีกว่า จากค่าความเค้นที่สูงกว่า เมื่อพิจารณาที่ความดัน 2 bar พบว่าพฤติกรรมการรับแรงอัดของชิ้นงานใช้อุณหภูมิ 650°C กับ 700°C มีลักษณะคล้ายกัน มากกว่าการใช้ความดัน 1 bar

5.4.1.2 ผลของความดันในการหลอมต่อพฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโพลีเอทิลีน

พฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานที่ใช้แรงดัน 2 bar ส่วนใหญ่มีแนวโน้มค่าความเค้นสูงกว่าการใช้แรงดัน 1 bar เนื่องจากการใช้แรงดันส่งผลถึงการไหลของน้ำอะลูมิเนียมเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างของชิ้นงาน หากใช้แรงดัน 2 bar จะทำให้การไหลและการแทรกซึมของน้ำอะลูมิเนียมดีกว่าการใช้แรงดัน 1 bar ซึ่งเมื่อชิ้นงานมีน้ำอะลูมิเนียมกระจายตัวทั่วชิ้นงาน ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูง และทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงอัดได้ดี โดยผ่านค่าความเค้นที่สูงกว่า ชิ้นงาน 1 bar

5.4.1.3 ผลของเวลาในการหลอมต่อพฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโพลีเอทิลีน

พฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่หล่อด้วยเวลา 30 นาที มีแนวโน้มของค่าความเค้นสูงกว่าชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่หล่อด้วยเวลา 10 นาที เนื่องจากเมื่อน้ำอะลูมิเนียมมีเวลาในการไหลตัวนานทำให้สามารถเข้าแทรกซึมไปในโครงสร้างโพลีเอทิลีนได้ดี ส่งผลให้โครงสร้างภายในของชิ้นงานโพลีเอทิลีนมีน้ำอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูง เมื่อได้รับแรงอัดก็จะแสดงค่าความเค้นที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีน้ำอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอ

5.4.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดคราก

5.4.2.1 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยอุณหภูมิต่างกัน

ชิ้นงานที่ผลิตด้วยอุณหภูมิ 650°C มีความแข็งแรงจุดครากใกล้เคียงกันยกเว้นชิ้นงานที่ผลิตโดยใช้แรงดัน 1 bar ระยะเวลา 10 นาที ซึ่งชิ้นงานดังกล่าวมีความแข็งแรงจุดครากต่ำเมื่อใช้อุณหภูมิในการหลอม 650°C ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ 35.89% ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตเป็น 700°C ชิ้นงานทุกชิ้นมีความแข็งแรงจุดครากสูงขึ้น แม้กระทั่งชิ้นงาน ที่ใช้แรงดัน 1 bar ระยะเวลา 10 นาที เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้น้ำโลหะมีความหนืดต่ำลงและไหลแทรกซึมลงไปในโครงสร้างโพลีเอทิลีนได้ดีขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่าชิ้นงานโพลีเอทิลีนส่วนใหญ่มีความแข็งแรงจุดครากสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น

5.4.2.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยด้วยแรงดันต่างกัน

ชิ้นงานที่ผลิตด้วยแรงดัน 1 bar เวลา 30 นาทีที่มีความแข็งแรงจุดครากเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 2 bar เนื่องจากแรงดันสูงช่วยให้น้ำอะลูมิเนียมไหลไปเติมเต็มช่องว่างของโครงสร้างโพลีเอทิลีนหล่อได้ดีกว่าแรงดันต่ำ ทำให้โอกาสเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ในชิ้นงานมีน้อย แล้วส่งผลให้ความแข็งแรงจุดครากสูง ทั้งนี้ในภาพรวมเมื่อเพิ่มแรงดันจาก 1 เป็น 2 bar

5.4.2.3 การเปรียบเทียบความแข็งแรงจุดครากของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยด้วยระยะเวลาหลอมต่างกัน

เช่นเดียวกันกับอุณหภูมิและแรงดัน ในขณะที่ชิ้นงานอื่นมีความแข็งแรงจุดครากเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิ 650°C และแรงดัน 1 bar มีความแข็งแรงจุดครากเพิ่มขึ้นอย่างมาก จาก 9.37 เป็น 23.69 MPa เนื่องจากน้ำอะลูมิเนียมมีเวลาในการไหลเข้าไปในช่องว่างของโครงสร้างโพลีเอทิลีน ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้น แล้วส่งผลถึงความแข็งแรงจุดครากที่มากขึ้น

ตารางที่ 5.2 แสดงการส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน

การส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน			
ปัจจัย	ส่งผลให้น้อยลง	ไม่ส่งผล	ส่งผลให้มากขึ้น
เพิ่มอุณหภูมิ		✓	✓
เพิ่มแรงดัน		✓	✓
เพิ่มระยะเวลา		✓	✓

5.4.3 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงาน

5.4.3.1 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยด้วยอุณหภูมิ ต่างกัน

ความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่หล่อด้วยด้วยอุณหภูมิ 650°C และแรงดัน 1 bar มีค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้เป็น 700°C ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนืดของน้ำอะลูมิเนียมลดลง ทำให้ไหลทั่วโครงสร้างชิ้นงานโคมดีขึ้น แต่ชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการหลอม 2 bar มีค่าการดูดซับพลังงานลดลง อาจมีสาเหตุจากเมื่อแรงดันมากและอุณหภูมิสูงทำให้น้ำอะลูมิเนียมมีความสามารถในการไหลดีมาก ทำให้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างรูพรุนภายในชิ้นงานโคมเปลี่ยนแปลงไปจากที่วางให้เรียงกันในแบบก่อนหลอม ทั้งนี้สมบัติการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโคมขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของรูพรุนภายในโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.25 โครงสร้างโคมที่มีรูพรุนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงานและมีเนื้อโลหะอยู่น้อยจะมีการดูดซับพลังงานน้อยกว่าโครงสร้างโคมที่เนื้อโลหะอยู่เยอะ จากรูปที่ 4.18 ชิ้นงานโคมทุกชิ้นจะมีค่าการดูดซับพลังงานใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 650 เป็น 700°C หมายความว่าโครงสร้างของชิ้นงานมีลักษณะใกล้เคียงกันมากขึ้น และมีการกระจายตัวของรูพรุนดีขึ้น

5.4.3.2 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยด้วยความดัน ต่างกัน

ความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่หล่อด้วยแรงดัน 2 bar มีแนวโน้มสูงขึ้นจากชิ้นงานที่หล่อด้วยแรงดัน 1 bar เมื่อใช้อุณหภูมิ 650°C ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการผลิต 700°C เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากแรงดันเป็นตัวช่วยให้น้ำอะลูมิเนียมที่แม้จะหนืดจากการหลอมที่อุณหภูมิ 650°C เคลื่อนตัวไปในช่องว่างของโครงสร้างโคมได้ดีขึ้น และส่งผลถึงความหนาแน่นสัมพัทธ์ให้มากขึ้น แล้วส่งผลถึงความสามารถในการดูดซับพลังงาน

5.4.3.3 การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยด้วยความดันต่างกัน

ความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานส่วนใหญ่ที่หล่อด้วยด้วยเวลา 30 นาทีเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเวลา 10 นาที เนื่องจากน้ำอะลูมิเนียมมีเวลาในการไหลลงไปในโครงสร้างโฟมมากกว่าทำให้ชิ้นงานโฟมที่ผลิตได้มีเนื้ออะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน แล้วส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานดีขึ้นด้วย

ตารางที่ 5. 5.3 แสดงการส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน

การส่งผลของปัจจัยการผลิตต่อการดูดซับพลังงาน			
ปัจจัย	ส่งผลให้น้อยลง	ไม่ส่งผล	ส่งผลให้มากขึ้น
เพิ่มอุณหภูมิ	✓		✓
เพิ่มแรงดัน		✓	✓
เพิ่มระยะเวลา			✓

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 ลูกบอลเกลือสามารถใช้ทำหน้าที่เป็นวัสดุแทนที่โพรงอากาศ (Space holder) ได้ เมื่อเตรียมด้วยวิธีการบดลดขนาดและผสมกับสารละลายตัวเชื่อมประสาน ซึ่งลูกบอลเกลือที่ถูกเผาผนึกแล้วมีความแข็งแรงมากพอต่อการผลิตชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป แต่อาจไม่มากพอสำหรับการผลิตชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปเนื่องจากแรงอัดส่งผลให้รูปร่างของลูกบอลเกลือเปลี่ยนเป็นวงรี นอกจากนี้ตัวเชื่อมประสานที่ใช้ผสมกับลูกบอลเกลือถูกกำจัดออกจนหมดเมื่อเผาผนึกลูกบอลเกลือที่อุณหภูมิสูงกว่า 200°C จึงไม่มีสารเจือปนอื่นที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหล่อโฟมอะลูมิเนียมจากลูกบอลเกลือ และลูกบอลเกลือสามารถถูกกำจัดออกจากโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมด้วยการละลายน้ำได้จนหมด ส่งผลให้โครงสร้างโฟมเป็นโครงสร้างแบบเปิด

6.1.2 โฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตขึ้นมาได้โดยการใช้ลูกบอลเกลือเป็นวัสดุแทนที่โพรงอากาศ และใช้แรงดันจากแก๊สอาร์กอน เป็นตัวช่วยให้น้ำอะลูมิเนียมไหลแทรกซึมลงไปในโครงสร้างโฟมได้ขณะหล่อในแบบทรงกระบอก

6.1.3 อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมมีผลต่อโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานโฟม โดยที่ทั้ง 3 ปัจจัยมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เมื่อใช้อุณหภูมิ 650°C แรงดัน 1 bar เวลา 10 นาที ในการหล่อชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดโพรงอากาศหรือช่องว่างขนาดใหญ่ อีกทั้งทำให้บางจุดมีเนื้ออะลูมิเนียมหนากว่าบางจุดซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลตัวที่ไม่ดีของน้ำอะลูมิเนียมที่เกิดจากการใช้อุณหภูมิในการหลอม แรงดัน และเวลาไม่เพียงพอ เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C แรงดัน 2 bar เวลา 30 นาที ส่งผลให้ชิ้นงานไม่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ และไม่พบจุดที่มีเนื้ออะลูมิเนียมหนากว่าปกติซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลตัวที่ดีของน้ำอะลูมิเนียม

6.1.4 อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการหล่อขึ้นงานโฟมอะลูมิเนียมมีผลต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของขึ้นงานโฟมอะลูมิเนียม โดยที่อุณหภูมิ 700°C ทำให้ขึ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าอุณหภูมิ 650°C แรงดัน 2 bar ทำให้ขึ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าแรงดัน 1 bar และระยะเวลาหลอม 30 นาที ทำให้ขึ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าระยะเวลาหลอม 10 นาที

6.1.5 อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการหล่อขึ้นงานโฟมอะลูมิเนียมมีผลต่อสมบัติค่าความแข็งแรงจุดครากของขึ้นงาน เมื่อใช้อุณหภูมิ 650°C ทำให้ค่าความแข็งแรงจุดครากของขึ้นงานกระจุกตัวอยู่ในช่วงที่ค่าไม่สูง แต่อุณหภูมิ 700°C ทำให้ค่าความแข็งแรงจุดครากของขึ้นงานส่วนใหญ่เพิ่มขึ้น แรงดัน 2 bar ทำให้ค่าความแข็งแรงจุดครากของขึ้นงานส่วนใหญ่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้แรงดัน 1 bar และระยะเวลาที่หลอม 30 นาที ทำให้ค่าความแข็งแรงจุดครากของยังลดลงในบางขึ้นงาน แต่มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น เมื่อเทียบกับระยะเวลาหลอม 10 นาที

6.1.6 อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการหล่อขึ้นงานโฟมอะลูมิเนียมมีผลต่อสมบัติการดูดซับพลังงานของขึ้นงาน เมื่อใช้อุณหภูมิ 700°C ทำให้การดูดซับพลังงานของขึ้นงานใกล้เคียงกันมากขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิ 650°C เมื่อใช้แรงดัน 2 bar ทำให้การดูดซับพลังงานของขึ้นงานส่วนใหญ่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้แรงดัน 1 bar เมื่อใช้ระยะเวลาในการหลอม 30 นาที ทำให้การดูดซับพลังงานของขึ้นงานส่วนใหญ่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ระยะเวลา 10 นาที

CHULALONGKORN UNIVERSITY

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การใช้ลูกบอลเกลียวที่ขึ้นรูปด้วยการปั่นเป็นวัสดุแทนที่โพรงอากาศมีข้อจำกัดคือเวลาและคุณภาพในการผลิต ดังนั้นหากสามารถใช้เครื่องจักรแทนการปั่นด้วยมือได้จะสามารถควบคุมขนาดรูปร่าง และปริมาณลูกบอลเกลียวได้

6.2.2 หากสามารถผลิตขึ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ใช้ลูกบอลเกลียวขนาดเล็กเท่าเดิมได้ จะทำให้ผลการทดสอบสมบัติทางกลมีความชัดเจนและแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากการเรียงตัวของโพรงอากาศของขึ้นงานโฟมขนาดเล็กจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลอย่างมาก

6.2.3 แบบสำหรับการหล่อชิ้นงานอะลูมิเนียมควรออกแบบให้น้ำอะลูมิเนียมไม่สามารถไหลทะลุออกนอกแบบได้ อีกทั้งควรออกแบบให้ภายในแบบเป็นระบบปิดให้มากที่สุดเพื่อป้องกันการรั่วไหลออกของแก๊สอาร์กอนที่ใช้เพื่อเพิ่มแรงดันในระบบ

6.2.4 ควรควบคุมขนาดของอินกอตอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับหล่อชิ้นงานโฟม ให้มีขนาดเท่ากันในการผลิตชิ้นงานโฟมแต่ละชิ้น เนื่องจากขนาดของอินกอตอะลูมิเนียมส่งผลถึงความเร็วในการหลอม ซึ่งอาจส่งผลถึงการไหลของน้ำอะลูมิเนียมในการหล่อชิ้นงานโฟม

6.2.5 ควรเพิ่มจำนวนชิ้นงานของแต่ละปัจจัยการผลิต เพื่อที่จะสามารถนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางกลได้จำนวนมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ผลการทดสอบแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วย

6.2.6 ควรเพิ่มจำนวนปัจจัยการผลิตที่ศึกษา เช่น เพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมจาก 650 และ 700 °C เป็น 650, 700 และ 750°C เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลการทดสอบต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายและดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

1. Asavavisithchai, D.S., *Cellular Metal*. 2009, Bangkok: Chulalongkorn University.
2. Sathurusinghe, P., et al. *Elastic properties of open cell metallic foams using finite element analysis and homogenization technique*. in *Conference Proceedings: 45th Institute of Engineers Pakistan Convention, Karachi, Pakistan*. 2012.
3. Liu, P. and G.-F. Chen, *Porous materials: processing and applications*. 2014: Elsevier.
4. Oshida, Y., *Advanced Materials, Technologies, and Processes*. Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials, 2013: p. 457-497.
5. García-Moreno, F., *Commercial applications of metal foams: Their properties and production*. Materials, 2016. **9**(2): p. 85.
6. Degischer, H.-P. and B. Kriszt, *Handbook of cellular metals*. Vol. 71. 2002: Wiley-VCH, Weinheim.
7. Gawdzińska, K. and M. Gucma, *Two-criteria analysis of casting technologies of metal and composite foams*. Archives of Metallurgy and Materials, 2015. **60**.
8. Queheillalt, D.T., D.J. Sypeck, and H.N. Wadley, *Ultrasonic characterization of cellular metal structures*. Materials Science and Engineering: A, 2002. **323**(1-2): p. 138-147.
9. Banhart, J., *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in materials science, 2001. **46**(6): p. 559-632.
10. Jinnapat, A. and A. Kennedy, *The manufacture of spherical salt beads and their use as dissolvable templates for the production of cellular solids via a powder metallurgy route*. Journal of Alloys and Compounds, 2010. **499**(1): p. 43-47.
11. Covaciu, M. and A.R. Kennedy, *Production process and properties of a highly porous al alloy made using NaCl droplets as a space holder*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2015. **28**(8): p. 1034-1040.

12. Sánchez, A., et al., *Manufacturing of Open-Cell Zn-22Al-2Cu Alloy Foams by a Centrifugal-Replication Process*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018. **49**(1): p. 272-281.
13. Gilani, H., et al., *Effect of processing parameters and glycerin addition on the properties of Al foams*. Metals and Materials International, 2012. **18**(2): p. 327-333.
14. Simone, A. and L.J. Gibson, *Aluminum foams produced by liquid-state processes*. Acta materialia, 1998. **46**(9): p. 3109-3123.
15. Luna, E.M.E., et al., *Casting protocols for the production of open cell aluminum foams by the replication technique and the effect on porosity*. JoVE (Journal of Visualized Experiments), 2014(94): p. e52268.
16. Quadbeck, P., et al. *Synthesis and properties of open-celled metal foams*. in *Materials Science Forum*. 2007. Trans Tech Publ.
17. Langston, P. and A.R. Kennedy, *Discrete element modelling of the packing of spheres and its application to the structure of porous metals made by infiltration of packed beds of NaCl beads*. Powder Technology, 2014. **268**: p. 210-218.
18. Gawdzińska, K., et al., *Deformation mechanisms in metal composite foams*. Metalurgija, 2016. **55**(1): p. 37-40.
19. Kaya, A. and C. Fleck, *Deformation behavior of open-cell stainless steel foams*. Materials Science and Engineering: A, 2014. **615**: p. 447-456.
20. Soboyejo, W.O. and T. Srivatsan, *Advanced structural materials: properties, design optimization, and applications*. 2006: CRC press.
21. Fiedler, T., et al. *Calculations of the thermal conductivity of porous materials*. in *Materials science forum*. 2006. Trans Tech Publ.

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Jutanon Boonprasert
วัน เดือน ปี เกิด	27 August 1991
สถานที่เกิด	Nakornrartchasi, Thailand
วุฒิการศึกษา	Metallurgical and Materials Engineering
ที่อยู่ปัจจุบัน	289/237 Onnut1/1 Onnut Rd. Prakanongnhea Wattana Bangkok Thailand 10260

