

ผลของอนุภาคเซรามิกใน โฟมอะลูมิเนียมต่อความแข็งแรงอัดของท่อที่ใส่โฟม

นาย อภิษ โสภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ      ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CERAMIC PARTICLES IN ALUMINIUM FOAMS ON COMPRESSIVE STRENGTH  
OF FOAM-FILLED TUBES

Mr. Apiyuchl Opa

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ผลของอนุภาคเซรามิกในโพลีเอทิลีนต่อความแข็งแรงอัดของท่อที่  
ใส่โพลี  
โดย                              นายอภิวิช โอภา  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา              อาจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว คำนชัยจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชาชาย เหลืองวรานันท์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

อภิษ ข โอภา : ผลของอนุภาคเซรามิกในโฟมอะลูมิเนียมต่อความแข็งแรงอัดของท่อที่ใส่โฟม.  
(EFFECTS OF CERAMIC PARTICLES IN ALUMINIUM FOAMS ON COMPRESSIVE  
STRENGTH OF FOAM-FILLED TUBES) อ. ที่ปรึกษา : ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 166 หน้า.

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของชนิดและปริมาณอนุภาคเซรามิก รวมทั้งความเร็วหัวกดที่มีต่อความแข็งแรงอัด ในกรณีท่อที่ใส่โฟมอะลูมิเนียมใส่ท่อและท่อที่ไม่ใส่ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม โดยผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง ที่อุณหภูมิ 800°C ตัดชิ้นงานให้มีขนาดความยาว 30 mm และเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm เพื่อนำไปทดสอบหาพฤติกรรมการรับแรงอัด จากผลการทดลองพบว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อมีค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าในโฟมอะลูมิเนียมที่ไม่ใส่ท่อ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นโดยรวมประมาณ 5 ถึง 10% ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปื่อยและการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกที่แตกต่างกันเป็นหลัก เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเซรามิกในโฟมอะลูมิเนียมไม่ใส่ท่อ ค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานจะขึ้นอยู่กับขนาดของโพรงอากาศเฉลี่ยเป็นหลัก แต่เมื่อนำโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกไปใส่ท่อ ค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคเซรามิกเพิ่มมากขึ้น โดยที่ปริมาณอนุภาคเซรามิก 5 wt.% สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานได้ถึง 32% โดยประมาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเซรามิกเป็นหลัก สำหรับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ไม่ใส่ท่อเมื่อทดสอบที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min จะมีความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ประมาณ 33% ซึ่งขึ้นอยู่กับกากระจายตัวของอนุภาค แต่ในกรณีที่น่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกไปใส่ท่อนั้นพบว่า ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากท่อจะช่วยให้การรับและดูดซับพลังงาน นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานของโฟมในท่อยังขึ้นอยู่กับค่าความกลมของโพรงอากาศ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอนุภาคเซรามิกที่เติมลงไป ในโฟมอะลูมิเนียม ความถี่ และการดูดซับพลังงานสามารถนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยแบ่งออกเป็น 8 สมการตามความเร็วหัวกดและชนิดของอนุภาคเซรามิก จากแบบจำลอง พบว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ใส่ท่อมีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงค่าที่วัดได้จริงมากกว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกโดยไม่ใส่ท่อ ประมาณ 19%

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2551.....

## 4870555321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: ALUMINIUM FOAM / CERAMIC PARTICLES / FOAM-FILLED TUBE /  
POWDER METALLURGY

APIYUCH OPA : EFFECTS OF CERAMIC PARTICLES IN ALUMINIUM FOAMS ON  
COMPRESSIVE STRENGTH OF FOAM-FILLED TUBES. THESIS ADVISOR :  
SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D., 166 pp.

This work studied the effects of different ceramic particles, their concentration and cross-head speed in compressive testing on the compressive strength and energy absorption of Al foams and Al foam-filled tubes. Al foams were produced using a powder metallurgical process at 800<sup>o</sup>C. The foams were transversely sectioned to the length of 30 mm in order to prepare the samples for the compression test. It was found that the increasing of ceramic particle additions was more pronounced in Al foam-filled tubes than that in Al foams. The compressive strength and the energy absorption of Al foam-filled tubes were increased between about 5 and 10% due to the wettability and distribution of the particles in Al melt. When the concentration of the particles increased, the compressive strength and the energy absorption were also increased. With the addition of 5 wt.% particles, the compressive strength and the energy absorption were increased approximately up to 32%, depending on the size of the particles. The compressive strength and the energy absorption at cross-head speed of 50 mm/min are higher than that at the speed of 5 mm/min, which is approximately 33% increased in Al foams, depending on the particle distribution in the melt. It was found that the compressive strength and the energy absorption of MMC foam-filled tubes for different types of ceramic particles are similar, owing to the major contribution in energy absorption of the tube. Moreover, the compressive strength and the energy absorption of MMC foam-filled tubes also depend on the circularity of pore in the foams.

The relation of ceramic particle concentration, compressive stress and energy absorption was used to develop eight mathematical models, based on the type of ceramic particles and the cross-head speeds. It was found that the MMC foam-filled tubes give closer energy absorption value of simulated samples to experimental samples than the MMC foams approximately 19%.

Department:.....Metallurgical Engineering..... Student’s Signature :.....

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

Academic Year: .....2008.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ของหลายๆฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย สำหรับการอุทิศตนและสละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ ที่เอาใจใส่ทั้งด้านการเรียน และการทำงานตลอดงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัชวິจิตร, อาจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์ และ อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการพัฒนาแบบจำลอง ขอขอบพระคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนผู้จัดทำในทุกด้านด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณรัฐ ดันดิศิริไพบุลย์ เพื่อนที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา รวมทั้งเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกคนสำหรับการสร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเตรียมชิ้นงาน และขอขอบคุณศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณครอบครัว รวมไปถึงคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลอันเป็นที่รักที่คอยให้กำลังใจในการสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 โฟมและวัสดุพูน.....	4
2.2 โฟมโลหะ.....	5
2.2.1 ความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	6
2.2.2 สมบัติทั่วไปของโฟมอะลูมิเนียม.....	6
2.2.3 การใช้งานของโฟมอะลูมิเนียม.....	7
2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	7
2.4 ข้อดีและข้อเสียของการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธี โลหะผง.....	8
2.5 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธี โลหะผง.....	8
2.6 การสร้างเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียม.....	10
2.6.1 ขนาดและปริมาณของอนุภาค.....	12
2.6.2 ความสามารถในการเปียก.....	14
2.6.3 แรงตึงผิว.....	16
2.7 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม.....	17
2.7.1 ความหนาแน่นของโฟม.....	19

2.7.2 การเติมธาตุผสม.....	20
2.7.3 ปริมาณของโพรงอากาศ.....	21
2.7.4 ขนาดของโพรงอากาศ.....	22
2.7.5 การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ.....	23
2.7.6 รูปร่างของโพรงอากาศ.....	24
2.7.7 ทิศทางของโพรงอากาศ.....	24
2.7.8 อัตราความเครียด.....	25
2.7.9 จุดบกพร่อง.....	26
2.7.10 กลไกที่เกิดขึ้นขณะรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด.....	27
2.8 พฤติกรรมการรับแรงอัดของวัสดุผสมประเภทพองอนุภาคเนื้อพื้นโลหะ.....	28
2.8.1 รอยต่อระหว่างเนื้อพื้นกับตัวเสริมแรง.....	28
2.8.2 ปริมาณอนุภาค.....	29
2.8.3 รูปร่างของอนุภาค.....	30
2.8.4 ขนาดของอนุภาค.....	31
2.8.5 การกระจายตัวของอนุภาค.....	32
2.8.6 ความหนาของผิวอนุภาค.....	33
2.8.7 อัตราความเครียด.....	34
2.9 พฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อเปล่า.....	34
2.10 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมในท่อ.....	38
2.10.1 อัตราความเครียด.....	40
2.10.2 ความยาวของท่อ.....	42
2.10.3 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างโฟมอะลูมิเนียมกับท่อ.....	43
2.10.4 ความหนาของท่อ.....	45
2.10.5 รูปร่างหน้าตัดของท่อ.....	47
2.10.6 วัสดุที่ใช้.....	47
2.11 แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมในท่อ.....	49
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>51</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	51
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	51



3.3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.3.1	การผลิต precursor.....	52
3.3.2	การผลิต โฟมอะลูมิเนียม.....	52
3.3.3	การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม.....	52
3.3.4	การทดสอบพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม.....	53
3.3.5	การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของ โฟมอะลูมิเนียม.....	54
3.3.6	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ โฟมอะลูมิเนียม.....	55
3.3.7	การตรวจสอบ โครงสร้างของ โฟมในท่อระหว่างการอัดที่ระยะอัดต่างๆกัน.....	55
3.3.8	การสร้างแบบจำลองจากข้อมูลการทดลอง.....	56
3.4	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	60
3.4.1	ขนาดและรูปร่างโพรงอากาศ.....	60
3.4.2	สมบัติทางกล.....	60
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลอง.....</b>	<b>61</b>
4.1	คุณลักษณะของวัสดุ.....	61
4.1.1	ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค.....	61
4.1.2	รูปร่างและลักษณะของอนุภาค.....	62
4.2	การขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียม.....	63
4.3	การวิเคราะห์โครงสร้าง.....	64
4.3.1	การขยายตัว.....	64
4.3.2	การกระจายตัวของอนุภาคบนผิวของผนัง โพรงอากาศ.....	69
4.3.3	การขีดเกาะของอนุภาคเซรามิกบน Plateau border.....	70
4.4	สมบัติทางกล.....	73
4.4.1	ความแข็งแรงอัด.....	73
4.4.1.1	โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	73
4.4.1.2	โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	74
4.4.1.3	โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	76

4.4.1.4 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	77
4.4.1.5 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	79
4.4.1.6 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	80
4.4.1.7 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	82
4.4.1.8 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อที่ความเร็ว หัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min.....	83
4.4.2 การดูดซับพลังงาน.....	85
4.4.2.1 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินา.....	85
4.4.2.2 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อ.....	86
4.4.2.3 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา.....	87
4.4.2.4 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อ.....	88
4.4.2.5 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์.....	89
4.4.2.6 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อ.....	90
4.4.2.7 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	91
4.4.2.8 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อ.....	92
4.4.3 ผลจากการเติมอนุภาคเซรามิกต่างๆ.....	93
4.4.3.1 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ปริมาณ ต่างกัน.....	93
4.4.3.2 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ปริมาณ ต่างกัน.....	94
4.4.3.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมที่ความเร็ว หัวกด 5 mm/min.....	96
4.4.3.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมในท่อที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	98

4.4.3.5 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียมที่ความเร็ว หัวกด 50 mm/min.....	101
4.4.3.6 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียมในท่อที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	103
4.5 การเปรียบเทียบค่าจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลอง.....	106
4.5.1 โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินา.....	106
4.5.2 โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา.....	108
4.5.3 โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์.....	111
4.5.4 โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	113
<b>บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....</b>	<b>116</b>
5.1 ผลของอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงาน.....	116
5.1.1 ในกรณีที่โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกไม่ใส่ท่อ.....	116
5.1.2 ในกรณีที่โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อ.....	121
5.2 ผลของปริมาณอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับ พลังงาน.....	123
5.2.1 ในกรณีที่โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกไม่ใส่ท่อ.....	123
5.2.2 ในกรณีที่โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อ.....	127
5.3 ผลของความเร็วหัวกดที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงาน.....	129
5.3.1 ในกรณีที่โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกไม่ใส่ท่อ.....	129
5.3.2 ในกรณีที่โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อ.....	132
5.4 แบบจำลองการดูดซับพลังงานเบื้องต้น.....	133
<b>บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>135</b>
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	135
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	136
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>137</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>142</b>
ภาคผนวก ก.....	143
ภาคผนวก ข.....	144
ภาคผนวก ค.....	145

ภาคผนวก ง.....	164
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>166</b>

๑

หน้า

บทที่

หน้า

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคต่างๆ.....	61
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยและความกลมของโพรงอากาศที่การขยายตัวสูงสุด ของโฟมอะลูมิเนียม.....	69
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min .....	107
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min .....	107
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อ และใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	109
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อ และใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min .....	110
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อ และใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min .....	112
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อ และใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min .....	112
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อ และใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	114
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก แบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อ และใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	115
ตารางที่ 1ค แสดงค่าคงที่ที่ได้จากเส้นแนวโน้มสมการกำลัง.....	149

ตารางที่ 2ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและ ใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	156
ตารางที่ 3ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและ ใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	157
ตารางที่ 4ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและ ใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	158
ตารางที่ 5ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและ ใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	159
ตารางที่ 6ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้ง ที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	160
ตารางที่ 7ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้ง ที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	161
ตารางที่ 8ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	162
ตารางที่ 9ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	163



๗

หน้า



## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุ.....	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะของ โฟมอะลูมิเนียม.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Youngs modulus) และ ความหนาแน่น (Density) กับวัสดุชนิดต่างๆ.....	7
รูปที่ 2.4 วิธีการที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	8
รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง.....	9
รูปที่ 2.6 บริเวณ Plateau border.....	10
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุเฉลี่ยโฟมและขนาดอนุภาค.....	12
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุเฉลี่ยโฟมและปริมาณอนุภาค.....	12
รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของ โฟมที่มีและไม่มีอนุภาคยึดเกาะ.....	13
รูปที่ 2.10 ของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุลกับของแข็งมีมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นเท่ากับ $\theta$ .....	14
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบกลไกที่มีต่อเสถียรภาพของ โฟมอะลูมิเนียมระหว่างอนุภาคที่เปียกและไม่เปียก.....	15
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิว ( $\sigma$ ) กับปริมาณอนุภาค (Particle volume) $Al_2O_3$ ที่ $700^{\circ}C$ .....	16
รูปที่ 2.13 กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ของ โฟมโลหะชนิดเดียวกัน.....	17
รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง โฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโลหะผสม AlSi7Mg0.45.....	17
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณรูพรุนของ โฟม และ ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับความเครียดของโลหะผสม AlSi7Mg0.45.....	18
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ โฟม.....	19
รูปที่ 2.17 ผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงตึงผิวของอะลูมิเนียมเหลว.....	20
รูปที่ 2.18 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของอะลูมิเนียมเหลว.....	20
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ โฟมกับความสามารถในการดูดซับพลังงานของ โฟมที่ทำจากโลหะผสม AlMg10.....	21
รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับความหนาผนังโพรงอากาศ.....	22

รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆกับการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ.....23

รูปที่ 2.22 แสดงผลของรูปร่างโพรงอากาศต่อความแข็งแรงอัด.....24

รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางในการรับแรงกับความแข็งแรงอัด.....25

รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับความแข็งแรงอัดและ  
การดูดซับพลังงาน.....26

รูปที่ 2.25 แสดงโครงสร้างโฟมโลหะที่มีจุดบกพร่อง.....26

รูปที่ 2.26 แสดงกลไกการเสียรูปขณะรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม.....27

รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบการไหลของความเค้นกับปริมาณอนุภาค.....29

รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับปริมาณอนุภาค.....30

รูปที่ 2.29 แสดงความเค้นตกค้างบริเวณ โดยรอบอนุภาคเซรามิก.....31

รูปที่ 2.30 แสดงช่องว่างและลักษณะการเกาะตัวของอนุภาค.....31

รูปที่ 2.31 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดแรงอัดของวัสดุผสมอนุภาคนานาขนาดต่างๆ.....32

รูปที่ 2.32 เปรียบเทียบความเค้นจากการเกาะกลุ่มในปริมาณต่างๆกัน.....33

รูปที่ 2.33 แสดงอากาศที่ถูกเก็บกักในพื้นที่หยาบ.....33

รูปที่ 2.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความเค้นและอัตราความเครียด  
ที่ความเครียดต่างๆกัน.....34

รูปที่ 2.35 แสดงกลไกการพับตัวของท่อแบบต่างๆ.....35

รูปที่ 2.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียดที่มีต่อลักษณะการเสียรูป.....35

รูปที่ 2.37 แสดงแบบจำลองกลไกการเสียรูปแบบสมมาตรของ Alexander.....36

รูปที่ 2.38 แสดงแบบจำลองกลไกการเสียรูปแบบสมมาตรของ Brzebieta.....36

รูปที่ 2.39 แสดงแบบจำลองกลไกการเสียรูปแบบสมมาตรของ Abramowicz และ Jones.....37

รูปที่ 2.40 การเกิดการเสียรูปแบบการโค้งเฉพาะที่ของท่อโลหะ.....37

รูปที่ 2.41 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมและท่อ.....38

รูปที่ 2.42 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน.....39

รูปที่ 2.43 แสดงความสามารถในการรับแรงอัดของโฟม ท่อ และโฟมในท่อ.....39

รูปที่ 2.44 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.18  
และ อัตราความเครียด  $3.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  และ  $3.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ .....40

รูปที่ 2.45 แสดงให้ค่าความเค้นพลาโตที่อัตราความเครียดที่เพิ่มจนถึง  $3.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ .....41

รูปที่ 2.46 การเกิดความชันบริเวณความเค้นพลาโตเนื่องจากอัตราความเครียดสูง.....41

รูปที่ 2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับการโค้งตัว.....	42
รูปที่ 2.48 โฟมในท่อและท่อเปล่าที่ความยาวสามระดับแสดง concertina และ diamond bulking mode.....	43
รูปที่ 2.49 แสดงพันธะระหว่างท่อกับโฟมในแบบต่างๆ.....	43
รูปที่ 2.50 ความแข็งแรงของโฟมอะลูมิเนียมในท่อที่พันธะแตกต่างกัน.....	44
รูปที่ 2.51 การทดสอบแรงอัดบนโฟมอะลูมิเนียมในท่อ ท่อเปล่า และโฟมอะลูมิเนียม.....	44
รูปที่ 2.52 ผลของความแข็งแรงของพันธะที่มีต่อการทดสอบแรงอัดในพันธะที่ต่างกัน.....	45
รูปที่ 2.53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่าง การดูดซับพลังงาน กับการเสียรูป.....	46
รูปที่ 2.54 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ทำให้เกิดการเสียรูป ขนาดของรอยพับ และแรงที่ทำให้เกิดรอยพับแรกที่มีความหนาต่างกัน.....	46
รูปที่ 2.55 แสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดที่มีต่อหน้าตัดท่อที่ต่างกัน.....	47
รูปที่ 2.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับการดูดซับพลังงาน ในท่อที่ใช้วัสดุแตกต่างกัน.....	48
รูปที่ 3.1 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโฟมอะลูมิเนียมเพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรม การรับแรงอัด.....	53
รูปที่ 3.2 ทิศทางที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน โฟมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	54
รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการตรวจสอบโครงสร้างของโฟมในท่อระหว่างการอัด.....	55
รูปที่ 3.4 พื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณการดูดซับพลังงาน.....	56
รูปที่ 4.1 รูปร่างและลักษณะของอนุภาคต่างๆ.....	62
รูปที่ 4.2 การขยายตัวของโฟมที่เสริมอนุภาคเซรามิกที่เวลาต่างๆกัน.....	63
รูปที่ 4.3 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆ.....	64
รูปที่ 4.4 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่เวลาต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.5 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่เวลาต่างๆ.....	66
รูปที่ 4.6 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เวลาต่างๆ.....	66
รูปที่ 4.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เวลาต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.8 แสดงขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมที่เวลาต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.9 ความเป็นวงกลมของโพรงอากาศที่เวลาต่างๆ.....	68
รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกบนผนังโพรงอากาศที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	69

รูปที่ 4.11 การยึดเกาะของอนุภาคอะลูมินาบนโพลีเอทิลีนบริเวณ Plateau border.....	70
รูปที่ 4.12 การยึดเกาะของอนุภาคซิลิกาบนโพลีเอทิลีนบริเวณ Plateau border.....	71
รูปที่ 4.13 การยึดเกาะของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์บนโพลีเอทิลีนบริเวณ Plateau border.....	71
รูปที่ 4.14 การยึดเกาะของไทเทเนียมคาร์ไบด์บนโพลีเอทิลีนบริเวณ Plateau border.....	72
รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	73
รูปที่ 4.16 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	74
รูปที่ 4.17 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	74
รูปที่ 4.18 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	75
รูปที่ 4.19 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	76
รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	77
รูปที่ 4.21 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	77
รูปที่ 4.22 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	78
รูปที่ 4.23 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	79
รูปที่ 4.24 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	80
รูปที่ 4.25 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	80
รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงอัดของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	81

รูปที่ 4.27 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์  
 ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....82

รูปที่ 4.28 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์  
 ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....82

รูปที่ 4.29 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์  
 ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....83

รูปที่ 4.30 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์  
 ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....84

รูปที่ 4.31 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ปริมาณต่างกัน.....85

รูปที่ 4.32 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อที่ปริมาณต่างกัน.....86

รูปที่ 4.33 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน.....87

รูปที่ 4.34 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในท่อที่ปริมาณต่างกัน.....88

รูปที่ 4.35 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างกัน.....89

รูปที่ 4.36 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกัน.....90

รูปที่ 4.37 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างกัน.....91

รูปที่ 4.38 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด  
 ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกัน.....92

รูปที่ 4.39 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่  
 ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....93

รูปที่ 4.40 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่  
 ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....93







จากแบบจำลอง.....	113
รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาค ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกันกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้ จากแบบจำลอง.....	114
รูปที่ 5.1 แสดงรูปร่างของโพรงอากาศและลักษณะการรับแรงอัด.....	120
รูปที่ 5.2 แสดงแรงที่เกิดขึ้นแก่โพรงอากาศในขณะที่ได้รับแรงอัด.....	121
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบการเพิ่มความหนืดระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็ก.....	124
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับปริมาณอนุภาค .....	124
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับความแข็งแรงอัด และการดูดซับพลังงาน.....	124
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนผิวเนื้อพื้น โลหะ.....	125
รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะการบีบอัด โพรงอากาศทางด้านข้างจากท่อ.....	127
รูปที่ 5.8 การสะสมของแรงบริเวณอนุภาคเซรามิก.....	129
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบการไหลของความเค้นที่ความเร็วหัวกดต่างๆกัน.....	130
รูปที่ 1ข แสดงการวัดขนาดและเส้นรอบวงของโพรงอากาศ.....	144
รูปที่ 1ค แสดงตัวอย่างวิธีการหาความเค้นจุดคราก.....	145
รูปที่ 2ค แสดงความเค้นจุดครากที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	147
รูปที่ 3ค แสดงความเค้นจุดครากที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	147
รูปที่ 4ค แสดงการหาสมการกำลังจากช่วง strain hardening.....	148
รูปที่ 5ค แสดงพลังงานอันตรายกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	151
รูปที่ 6ค แสดงพลังงานอันตรายกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	151
รูปที่ 7ค แสดงพลังงานอันตรายกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	152
รูปที่ 8ค แสดงพลังงานอันตรายกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....	152
รูปที่ 9ค แสดงพลังงานอันตรายกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....	153

รูปที่ 10ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์  
 ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....153

รูปที่ 11ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์  
 ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min.....154

รูปที่ 12ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์  
 ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min.....154

รูปที่ 1ง แสดงพฤติกรรมรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ใส่ท่อ.....164

รูปที่ 2ง แสดงพฤติกรรมรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาใส่ท่อ.....164

รูปที่ 3ง แสดงพฤติกรรมรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาใส่ท่อ.....165

รูปที่ 4ง แสดงพฤติกรรมรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาค  
 ซิลิกอนคาร์ไบด์ใส่ท่อ.....165

รูปที่ 5ง แสดงพฤติกรรมรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาค  
 ไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อ.....165

ป

หน้า

๗

หน้า

ภาพประกอบ

หน้า

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบัน โฟมอะลูมิเนียมเริ่มเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความต้านทานการนำความร้อนที่ดี มีการดูดซับพลังงานที่ดีในระหว่างการอัด หรือแม้แต่การนำไปใช้เป็นตัวดูดซับเสียง เป็นต้น ทำให้การนำโฟมอะลูมิเนียมไปใช้งานมีความหลากหลายมาก

ในบางกรณีสามารถเพิ่มเสถียรภาพให้โฟมอะลูมิเนียมได้โดยการเติมอนุภาคเซรามิก ซึ่งอนุภาคเซรามิกจะขัดขวางการไหลของอะลูมิเนียมเหลวไปที่ฐานโฟม เนื่องจากอนุภาคเซรามิกจะเพิ่มความหนืดของอะลูมิเนียมเหลวและยังช่วยลดการรวมตัวกันของโพรงอากาศในโฟม การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมยังเกิดได้จากการที่อนุภาคเซรามิกไปอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอากาศและของเหลว โดยจะทำให้ความโค้งของผิวสัมผัสเปลี่ยนไปและยังช่วยลดความแตกต่างของความดันระหว่าง Plateau border และผนังโพรงอากาศ เป็นผลให้การไหลของอะลูมิเนียมเหลวลดลง นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงดึงผิวของอะลูมิเนียมเหลวทำให้โครงสร้างของโฟมมีความสม่ำเสมอมากขึ้นอีกด้วย

การเติมโฟมโลหะเข้าไปในท่อโลหะจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงอัดจากการเปลี่ยนกลไกการโก่งส่วนตัวท่อโลหะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ตัวโฟม ทำให้โฟมอะลูมิเนียมในท่อโลหะมีสมบัติที่ดีทั้งความเบาและความแข็งแรง ดังนั้นถ้าโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้มีโครงสร้างภายในที่สม่ำเสมอรวมทั้งมีการเพิ่มประสิทธิภาพของโฟมโดยการผสมอนุภาคเซรามิกก็จะเป็นไปได้ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของความแข็งแรงของท่อที่ใส่โฟมอะลูมิเนียม

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วยอนุภาคเซรามิกในท่อซึ่งสามารถทนทานต่อแรงอัดได้มากกว่าวัสดุชนิดอื่นในปริมาณที่เท่ากัน โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดวิเคราะห์ควบคุมกันไปเพื่อให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและใกล้เคียงสถานะจริงที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้ประเภทของอนุภาคเซรามิกที่ต่างกันที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อโลหะที่ใส่โพลีอะลูมิเนียม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณอนุภาคเซรามิกที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อโลหะที่ใส่โพลีอะลูมิเนียม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลความเร็วหัวกดที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อที่ใส่โพลีอะลูมิเนียม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ตรวจสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใส่โพลีอะลูมิเนียมที่เติมอนุภาค  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $SiC$  และ  $TiC$
- 1.3.2 ตรวจสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใส่โพลีอะลูมิเนียมที่มีอัตราส่วนของอนุภาคเซรามิก 0% 1% 3% และ 5% โดยน้ำหนัก
- 1.3.3 ตรวจสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใส่โพลีอะลูมิเนียมหน้าตัดวงกลม

## 1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.4.1 จำกัดความเร็วหัวกดต่ำสุดที่ 5 mm/min เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ไม่สามารถนำข้อมูลจำนวนมากออกมาวิเคราะห์ได้
- 1.4.2 ขนาดของอนุภาคเซรามิกที่ใช้มีขนาดไม่เท่ากันจึงนำมาเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคเซรามิกที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานได้ไม่ดัดนัก



1.4.3 การเติมอนุภาคเซรามิกลงไปโฟมอะลูมิเนียมสูงสุดได้เพียง 5% เพราะหากเติมมากกว่านี้ทำให้มีความหนืดมากเกินไป ชิ้นงานที่ได้จึงมีขนาดเล็กกว่าที่ต้องการไม่สามารถนำไปทดสอบได้

1.4.4 ท่อที่นำมาสวม โฟมอะลูมิเนียมมีความหนา 1 mm เนื่องจากมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน เพื่อให้ชิ้นงานสวมเข้าไปได้พอดีและเป็นขนาดเดียวกับแม่แบบในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

## 1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

โฟมอะลูมิเนียม (Al foam), ท่อที่ใส่โฟม (Foam-filled tube), กรรมวิธีโลหะผง (Powder metallurgy), การดูดซับพลังงาน (Energy absorption), MMCs (Metal matrix composites)

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของการใช้ประเภทของอนุภาคเซรามิกที่ต่างกันที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อโลหะที่ใส่โฟมอะลูมิเนียม

1.6.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของปริมาณอนุภาคเซรามิกที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อโลหะที่ใส่โฟมอะลูมิเนียม

1.6.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของความเร็วหัวกดที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อโลหะที่ใส่โฟมอะลูมิเนียม

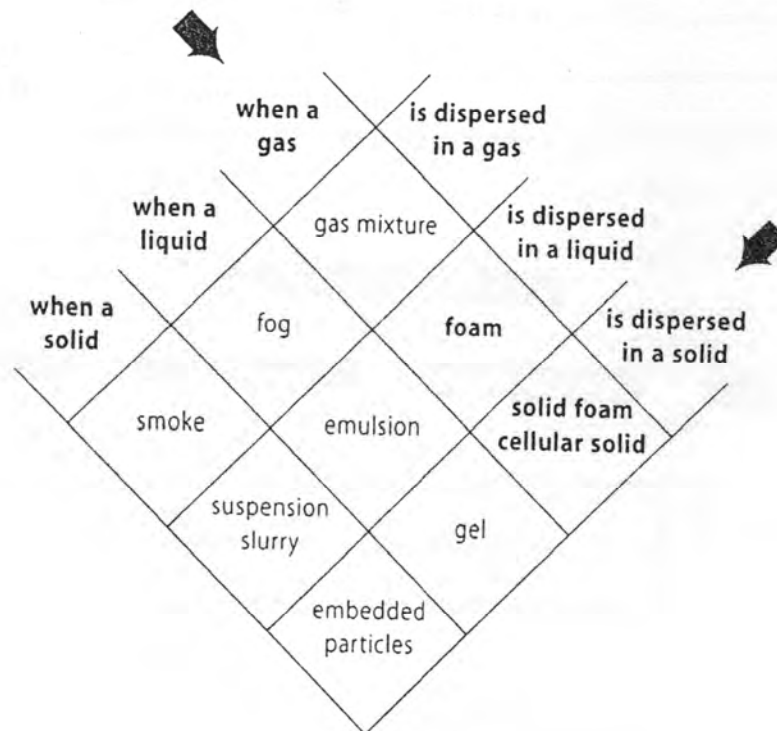
1.6.4 สามารถพัฒนาแบบจำลองจากความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อโลหะที่ใส่โฟมอะลูมิเนียม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โฟมและวัสดุพอรุน

โฟมและวัสดุพอรุน มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น มีความแข็งตึงสูง (High stiffness) ในขณะที่มีความหนาแน่นต่ำ สามารถให้แก๊สซึมผ่านได้ดีและมีความต้านทานความร้อนที่ดี เป็นต้น [1] การแยกประเภทว่าวัสดุชนิดใดเป็นโฟมหรือวัสดุพอรุนนั้นสามารถพิจารณาจากเฟสของวัสดุ หากมีเฟสของแก๊สอยู่อย่างกระจัดกระจายทั่วไปในปริมาณมากในเฟสของเหลวหรือของแข็งจึงจะเรียกวัดุนั้นว่าโฟม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตัวอย่างที่พบเห็นได้ทั่วไป ได้แก่ สบู่ โฟมพอลิเมอร์ และ โฟมเซรามิก เป็นต้น



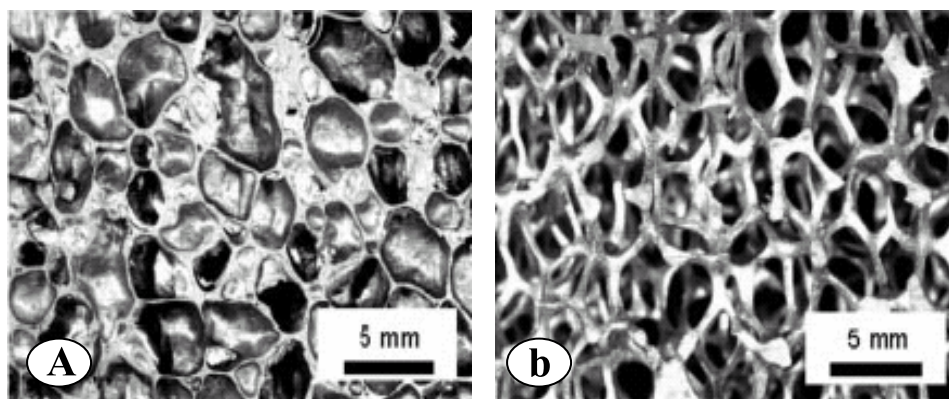
รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุ [1]

วัสดุไม่ว่าจะเป็นที่มีในธรรมชาติหรือที่มนุษย์สร้างขึ้นเองนั้นจะมีสมบัติและลักษณะการใช้งานแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับเนื้อวัสดุ เช่น ไม้ หรือ กระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุโครงสร้างที่ธรรมชาติสร้างขึ้น ส่วนวัสดุแบบพอรุนที่ผลิตโดยมนุษย์นั้น ได้แก่ โฟมพอลิเมอร์และโฟมเซรามิก ซึ่งมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ตัวกรอง แม่แบบผลิตโฟมโลหะ และวัสดุที่ใช้ในการตกแต่ง

นอกจากนี้โลหะและโลหะผสม ก็สามารถผลิตให้มีลักษณะโครงสร้างแบบรูพรุน หรือ โฟมได้ และวัสดุเหล่านี้มีสมบัติที่น่าสนใจในการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ

## 2.2 โฟมโลหะ

โฟมโลหะ หมายถึง โลหะที่มีโพรงอากาศ (Pores) กระจายตัวอยู่ภายในมากกว่า 25% โดยปริมาตร และในการผลิตโฟมโลหะนั้น สามารถผลิตได้ทั้งในสถานะของเหลวและกึ่งของแข็ง วิธีการในการผลิตโฟมโลหะนั้นมีอยู่มากมาย บางวิธีใช้หลักการเดียวกันกับการผลิตโฟมพอลิเมอร์ ในขณะที่บางวิธีการได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ใช้ข้อได้เปรียบในเรื่องสมบัติของโลหะ เช่น สามารถเกิดการเผาประสาน (Sintering) ได้หรือสามารถใช้การเคลือบด้วยไฟฟ้าได้ (Electro deposition) [1] จากวิธีเหล่านี้สามารถผลิตโฟมโลหะออกมาได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) โฟมที่มีโครงสร้างแบบปิด (Close-cell foam) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีผนัง ปกคลุมทั้งพื้นผิวและขอบของโพรงอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 a ซึ่งลักษณะการใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ในด้านวิศวกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา เป็นต้น 2) โฟมที่มีโครงสร้างแบบเปิด (Open-cell foam) มีลักษณะเป็นเสาค้ำ (Struts) ซึ่งจะพบบริเวณขอบของโพรงอากาศเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 b โดยมีลักษณะการใช้งานส่วนใหญ่เพื่อทำหน้าที่กรองสารและใช้เป็นตัวถ่ายเทความร้อน (Heat exchanger) โดยสมบัติของโฟมโลหะจะขึ้นอยู่กับรูปแบบและโครงสร้างโพรงอากาศของโฟมซึ่งสามารถคำนวณและดูจากแผนภูมิได้ดังหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 ลักษณะของโฟมอะลูมิเนียม a) โครงสร้างโฟมแบบปิด b) โครงสร้างโฟมแบบเปิด [2]

### 2.2.1 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ ( $\rho^*$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของโลหะชนิดนั้นๆ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถแสดงได้ในสมการที่ 2.1

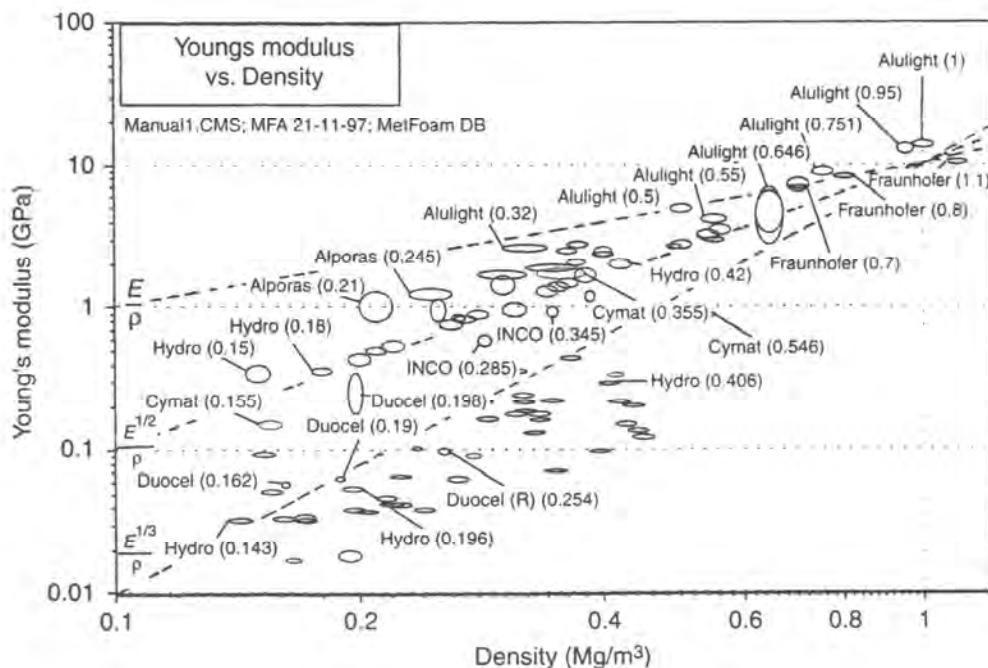
$$\% \rho^* = \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \times 100\% \quad (2.1)$$

โดยที่  $\rho_f$  คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะและ  $\rho_s$  คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งความหนาแน่นของโฟมโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่ต่างกัน เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ต่างกัน [3] และสามารถหาปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ (P) ซึ่งมีหน่วยเป็น % แสดงในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตรของโลหะชนิดนั้นๆ โดยปริมาณของโพรงอากาศสามารถแสดงได้ในสมการที่ 2.2

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

### 2.2.2 สมบัติทั่วไปของโฟมอะลูมิเนียม

โฟมอะลูมิเนียมคือโฟมที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโฟม โฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ประกอบไปด้วยโพรงอากาศที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม โฟมอะลูมิเนียมมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ความแข็งตึงสูงในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดที่ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ ในการวัดและเก็บข้อมูลของโฟมโลหะนั้นไม่สามารถที่จะเก็บข้อมูลในรูปของค่าคงที่ได้ เนื่องจากมีตัวแปรมากมายไม่สามารถที่จะควบคุมได้อย่างเหมาะสม เช่น จำนวนและขนาดของรูพรุนในชิ้นงานแต่ละชิ้นแม้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกันแต่สมบัติที่ได้แตกต่างกัน เป็นต้น ดังนั้นข้อมูลจึงอยู่ในรูปของช่วงซึ่งแสดงในลักษณะของกราฟแผนภูมิรูปภาพสำหรับเปรียบเทียบกับวัสดุโฟมโลหะชนิดต่างๆดังรูปที่ 2.3



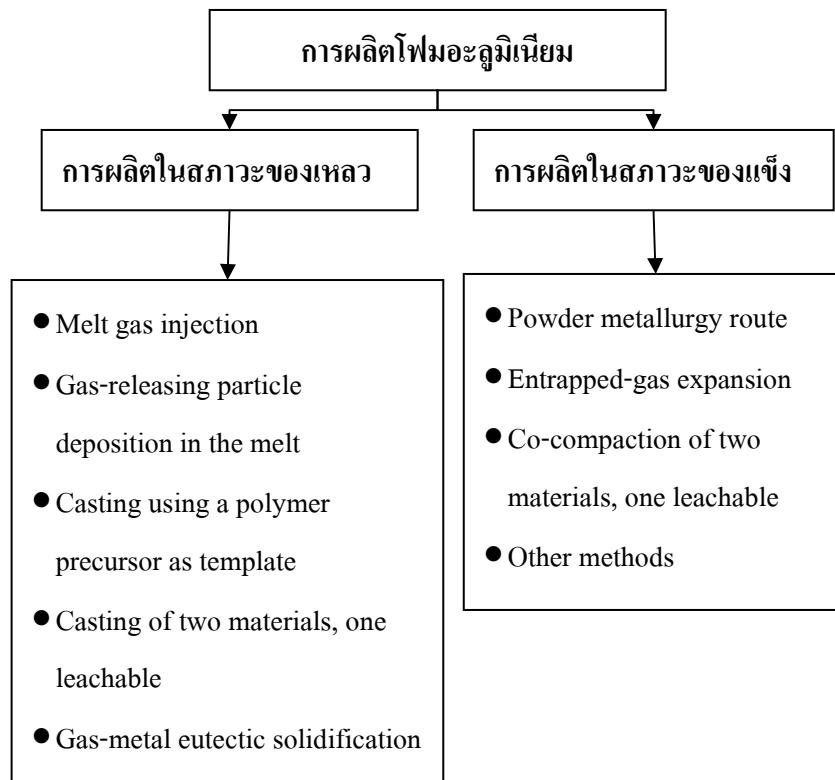
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's modulus) และความหนาแน่น (Density) กับวัสดุชนิดต่างๆ [4]

### 2.2.3 การใช้งานของโฟมอะลูมิเนียม

โดยส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นวัสดุดูดซับแรงกระแทกในรถยนต์ ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ และใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียงบนถนน [4, 5] นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตใหม่ได้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถถึง 50% ขึ้นรูปได้ง่าย เนื่องจากสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมสามารถควบคุมได้จากการควบคุมรูปร่างของโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียม ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการควบคุมรูปร่างของโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการไม่ว่าจะเป็นโดยกรรมวิธีโลหะผงหรือโลหะเหลว [6]

### 2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

วิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้หลายวิธี สามารถจำแนกได้ตามสถานะของอะลูมิเนียมในกระบวนการผลิต คือ 1) การผลิตในสถานะของเหลว 2) การผลิตในสถานะของแข็ง 3) การผลิตโดยใช้สารประกอบโลหะในสถานะแก๊ส (Gaseous metallic compounds) และ 4) การผลิตโดยสารละลายไอออน (Metal ion solution) แต่วิธีที่นิยมในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีเพียง 2 วิธีแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถควบคุมได้ง่ายและต้นทุนต่ำกว่าอีก 2 วิธี



รูปที่ 2.4 วิธีการที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม [1]

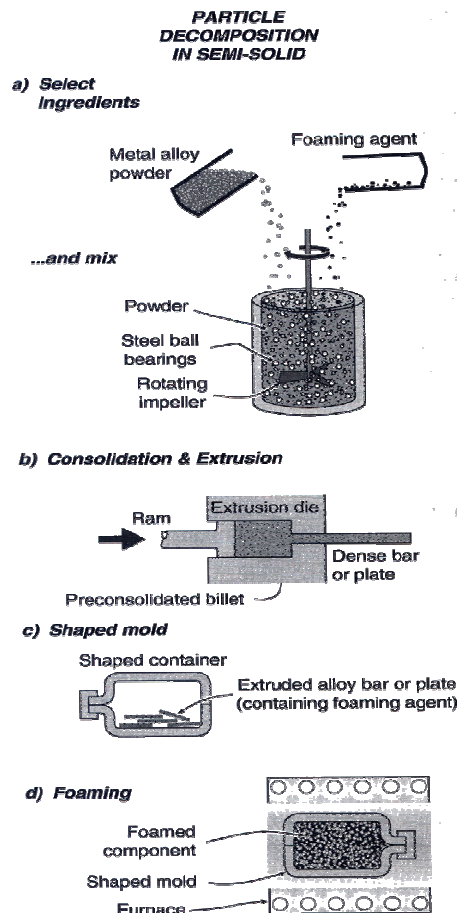
#### 2.4 ข้อดีและข้อเสียของการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง

การผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผงนั้นเป็นหนึ่งในกรรมวิธีการผลิตในสถานะของแข็งซึ่งวิธีการผลิตจากผงโลหะมีข้อดีคือ สามารถผลิตได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างที่ต้องการ, ไม่จำเป็นต้องเติมอนุภาคขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับโฟม, สามารถเลือกใช้โลหะผสมได้หลายชนิดในการนำมาผลิตโฟม และ มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวเนื่องจากการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอมากกว่า ข้อเสียของวิธีการนี้คือมีค่าใช้จ่ายในส่วนของผงโลหะที่สูง และ การผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ทำได้ยาก [7, 8]

#### 2.5 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง

กระบวนการผลิตเริ่มจากการผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับสารทำให้เกิดแก๊ส (Foaming agent) เพื่อทำให้เกิดโฟมขึ้น โดยทั่วไปจะนิยมใช้ไทเทเนียมไฮไดรด์ ( $\text{TiH}_2$ ) เป็น Foaming agent และจะใช้ในปริมาณระหว่าง 0.6-1.0 wt% ซึ่งเพียงพอต่อการสร้างโพรงอากาศภายในโฟม [9, 10, 11] ผงที่

ผ่านการผสมอย่างดีแล้ว (Homogeneous mixing) จะถูกนำไปอัดขึ้นรูป ซึ่งงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วจะเรียกว่า “Foamable Precursor” การอัดขึ้นรูปนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบเย็น เช่น การอัดด้วยความดันแกนเดียว (Uniaxial pressing) การอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง (Isostatic pressing) การอัดผ่านแบบที่อุณหภูมิสูง (Extrusion) การอัดขึ้นรูปที่ใช้ความร้อนนั้นมีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากกว่า เนื่องจากจะได้รับความหนาแน่นของ Precursor ที่สูงใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) แต่สำหรับผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์การอัดขึ้นรูปแบบเย็นก็สามารถที่จะผลิต Precursor ที่มีความหนาแน่นสูงได้จากนั้นนำ Precursor ไปใส่ในแม่พิมพ์และนำไปเข้าเตาอบ เมื่อให้ความร้อนแก่ Precursor จนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของผงอะลูมิเนียมไทเทเนียมไฮไดรด์ ( $\text{TiH}_2$ ) ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ  $400-450\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซึ่งจะสร้างโพรงอากาศใน Precursor ที่หลอมเหลวทำให้เกิดการขยายตัวขึ้น และจะได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูพรุนแบบปิด (Closed cells) การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง มีขั้นตอนเป็นไปตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง [4]

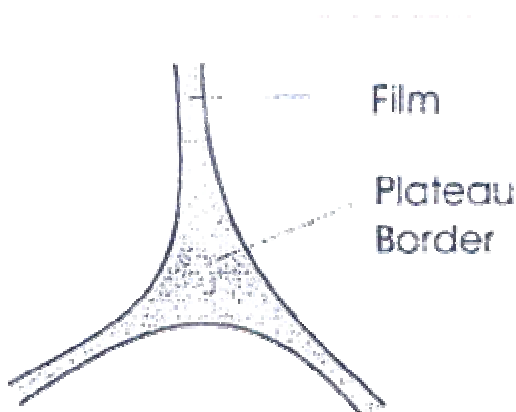
## 2.6 การสร้างเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียม (Stabilization of Al foams)

เสถียรภาพของโฟมหมายถึง ความสามารถของวัสดุที่จะคงอยู่ในสถานะโฟมได้ โฟมโดยธรรมชาติแล้วจะมีพลังงานอิสระที่สูงในทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ถือเป็นระบบที่ไม่เสถียร การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมออร์แกนิกนั้นทำได้โดยการเติม Surfactant ซึ่งจะเกิดเป็นฟิล์มชั้นเดียวเพื่อลดแรงตึงผิว เพิ่มความหนืด และสร้าง Disjoining force ในการป้องกันฟิล์มจากการยุบตัว เสถียรภาพของโฟมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยประกอบไปด้วยปัจจัยหลัก 4 ปัจจัยได้แก่ การแตกของฟอง (Rupture) การยุบตัว (Collapse) การเกาะตัวเป็นก้อน (Coagulation) และการเกิดการไหลของของเหลว Drainage ที่ผนังโพรงอากาศ โดย 3 ปัจจัยแรกนั้นจะเป็นการเกิดแบบทันทีทันใด แต่การเกิด Drainage จะขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของ Plateau border ความหนาของผนังโพรงอากาศ ความหนืด ขนาดของโพรงอากาศ เป็นต้น [12]

ส่วนในกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียม นั้น จะมีการถ่ายเทมวลสาร (Transport Phenomena) ที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วย [13]

- Gravitational sedimentation (drainage) คือการไหลของน้ำโลหะเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงโลก
- การบางลงของผนังโพรงอากาศ เนื่องจากแรงดันผิวสัมผัส (Capillarity-driven cell wall thinning) เกิดจากการที่โลหะเหลวไหลจากบริเวณผนังโพรงอากาศ ไปยังบริเวณ Plateau border เนื่องจากผลของความแตกต่างระหว่างแรงตึงผิวของทั้ง 2 บริเวณทำให้เกิดความแตกต่างของความดันเกิดขึ้น รูปที่

### 2.6 แสดงภาพบริเวณ Plateau border



รูปที่ 2.6 บริเวณ Plateau border [14]



- Interbubble gas diffusion เกิดจากความแตกต่างของความดันแก๊สระหว่างโพรงอากาศ ที่มีขนาดต่างๆกัน

ปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีผลทำให้โฟมที่ได้ไม่มีเสถียรภาพ เช่น เกิดการหยาบขึ้นของโพรงอากาศ (Coarsening), การผสานรวมกันของโพรงอากาศ (Cell coalescence) และการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศ (Cell wall rupture) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าการสร้างเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้โดย 1) เพิ่ม Bulk viscosity ให้กับโลหะหลอมเหลว 2) เพิ่ม Surface viscosity ให้กับผนังโพรงอากาศ และ Plateau borders 3) การเพิ่มความแตกต่างของแรงตึงผิว

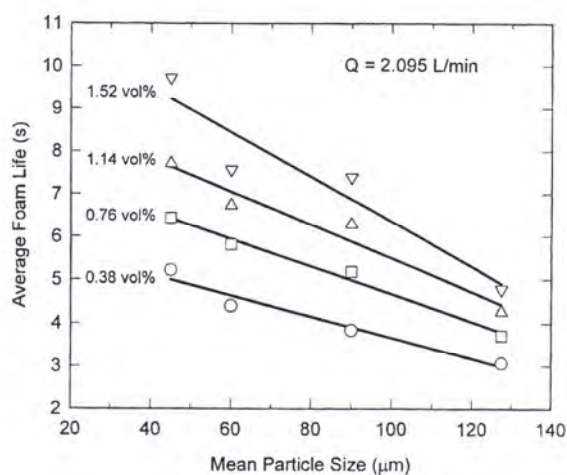
การสร้างเสถียรภาพให้กับโฟมสามารถทำได้โดยการผสมอนุภาคเล็กๆเข้าไปในโฟมอะลูมิเนียมซึ่งมีกลไกที่เกิดขึ้นดังนี้ [15]

- 1) การกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอจะเพิ่มความหนืดให้แก่อะลูมิเนียมเหลวจึงช่วยลดการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะให้ช้าลง โดยเฉพาะบริเวณที่มีฟิล์มบางๆเมื่ออนุภาคมาสัมผัสจะเกิดเป็นตัวกีดขวาง หากฟิล์มบางกว่านี้จะสร้างสิ่งกีดขวางและไม่สามารถผ่านไปยังอะลูมิเนียมเหลวได้ ด้วยเหตุนี้การสร้างเสถียรภาพด้วยตัวเอง (Self stabilizing) ต้องคำนึงถึงประเภท ขนาด และปริมาณของอนุภาคที่เติมด้วย ยิ่งกว่านั้นหากเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตจะทำให้ความหนืดลดลง เพราะฉะนั้นควรทำที่อุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลว
- 2) อนุภาคเหล่านี้ยังช่วยเพิ่มส่วนโค้งรอบๆ Plateau border และลดการดูดของอะลูมิเนียมเหลวจากฟิล์มไปสู่ Plateau border
- 3) มุมในการเกิดการเปียกควรมีค่าเป็นช่วงที่แน่นอน เพื่อที่จะแน่ใจได้ว่ารอยต่อระหว่างโพรงอากาศกับอนุภาค (Bubble/particle interfaces) มีเสถียรภาพเมื่อเกิดโพรงอากาศขึ้นในอะลูมิเนียมเหลว (อนุภาคไม่หลุดออกจากโพรงอากาศ) และในบริเวณรอยต่อระหว่าง Bubble/particle/bubble เช่นกัน และจะไม่เกิดเสถียรภาพหากไม่เกิดการเปียกที่เพียงพอ (Contact angle สูง) เช่นเดียวกับการเกิดการเปียกที่มากเกินไป (Contact angle ต่ำ) ดังนั้นหากเรารู้มุมในการเกิดการเปียกกับอะลูมิเนียมเหลวก็สามารถเพิ่มเสถียรภาพแก่โฟมอะลูมิเนียมได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

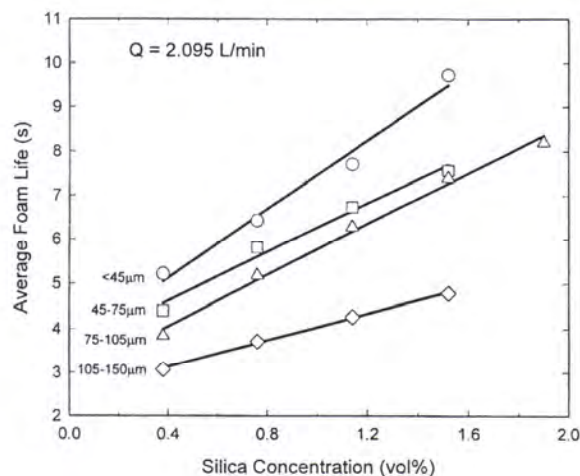
ส่วนปัจจัยต่างๆในการเติมอนุภาคขนาดเล็กที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของโฟมมีดังต่อไปนี้

### 2.6.1 ขนาด (Particle size) และปริมาณ (Particle concentration)

ขนาดและปริมาณของอนุภาคในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม ซึ่งการเติมอนุภาคเล็กๆลงไปในโฟมอะลูมิเนียมโดยหลักการแล้วจะเพิ่มความหนืดให้แก่โฟมอะลูมิเนียมแต่ยังส่งผลต่อการไหลของอะลูมิเนียมในขณะที่เกิดการหลอมเหลวไปที่ฐานของโฟมเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงโลกและการแตกของฟองอากาศ (Rupture process) จากการศึกษายของ S.W. Ip et al. [14] พบว่าเมื่อเติมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ลงไปในขนาดที่ต่างกันจากขนาดใหญ่ไปจนถึงเล็ก อนุภาคขนาดเล็กจะเพิ่มเสถียรภาพได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และปริมาณอนุภาคที่เติมลงไปมากขึ้นจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.8

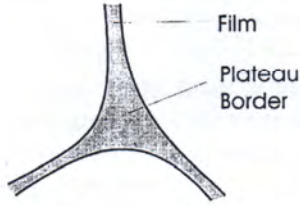

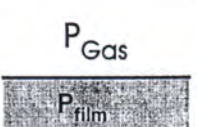
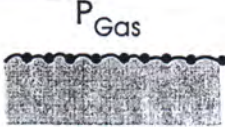
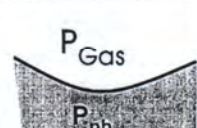
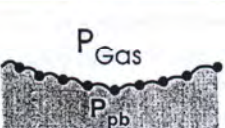


รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุเฉลี่ยโฟมและขนาดอนุภาค [14]



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุเฉลี่ยโฟมและปริมาณอนุภาค [14]

อนุภาคที่เติมลงไปนี้จะช่วยเพิ่มหรือลดเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมนั้นต้องพิจารณาจาก 1) การดึงดูด (Affinity) ระหว่างอนุภาคและของเหลว หรือมีแนวโน้มที่จะรวมกันบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและแก๊ส (Gas-liquid interface) เพราะหากมีการดึงดูดกันน้อยตัวอนุภาคจะไม่ช่วยขัดขวางการไหลของอะลูมิเนียมเหลว 2) หากมีการรวมตัวกันของอนุภาคได้ดีแต่ไม่มีการกระจายตัวที่ดีจะไม่สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ตัวโฟมได้ดีเท่าที่ควร การกระจายตัวของอนุภาคอย่างมีเสถียรภาพในโฟมอะลูมิเนียมส่งผลให้ความหนืดมากขึ้นจึงทำให้การไหลของอะลูมิเนียมช้าลงและขัดขวางการเกิด Drainage ก่อนที่จะแข็งตัว นอกจากนี้การยึดติดบริเวณ Gas-liquid interface จะเปลี่ยนส่วนโค้งที่ผิวสัมผัส (Interfacial curvatures) และลดแรงดันผิวสัมผัส (Capillary pressure) ที่แตกต่างกันระหว่างบริเวณ Plateau border และ ผนังโพรงอากาศ (Cell wall) ของโฟมอะลูมิเนียม ด้วยเหตุนี้โฟมอะลูมิเนียมจึงมีเสถียรภาพมากขึ้นจากการกีดขวางการไหลของอะลูมิเนียมให้ไหลได้ยากขึ้นที่ผิวของฟิล์มดังรูปที่ 2.9

	Without Particles	With Particles
		
Film		
Plateau Border		
	$P_{Gas} \approx P_{film} > P_{pb}$	$P_{Gas} > P_{film} \approx P_{pb}$

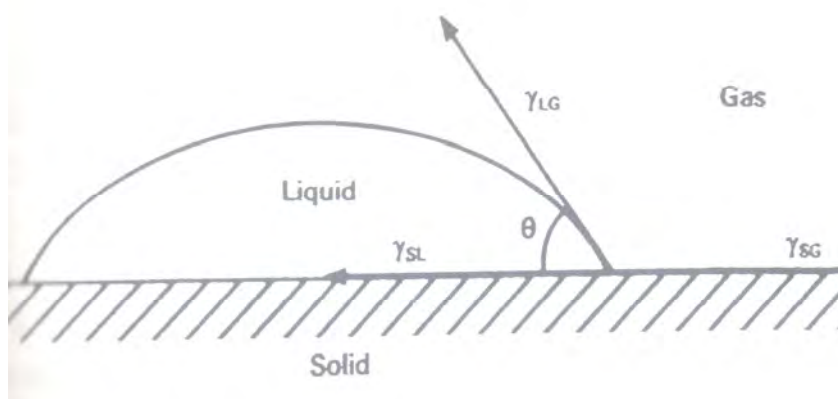
รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของโฟมที่มีและไม่มีอนุภาคยึดเกาะ [14]

จากรูปแสดงให้เห็นว่าขนาดและปริมาณมีผลต่อเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม จากการศึกษาของ W. Deqing และ S. Ziyuan [17] พบว่าการเติมอนุภาค SiC และ  $Al_2O_3$  ในปริมาณและขนาดที่ต่างกันไม่ว่าจะเติมอนุภาคขนาดใหญ่ในปริมาณที่น้อยหรือขนาดเล็กในปริมาณที่มากก็

ไม่สามารถเกิดโฟมอะลูมิเนียมที่มีเสถียรภาพได้ เนื่องจากการเติมอนุภาคที่ใหญ่กว่าเพียงเล็กน้อยไม่สามารถครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของ Gas-liquid interface ได้ โฟมอะลูมิเนียมที่ได้จึงไม่มีเสถียรภาพส่วนการเติมอนุภาคที่เล็กกว่าในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้มีความหนืดที่สูงมากจึงไม่สามารถผลิตได้ด้วยแรงดันแก๊สปกติ ดังนั้นการเติมอนุภาคทั้งสองชนิดนี้จะต้องเติมในปริมาณที่พอเหมาะหรือไม่เกินค่าวิกฤต (Critical concentration) ของแต่ละชนิดที่อุณหภูมิในการผลิตนั้นๆ

## 2.6.2 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

พันธะบริเวณผิวสัมผัส (Interfacial bonding) เกิดจากการประสานติดกันระหว่างอนุภาคกับวัสดุเนื้อพื้น หรือหมายถึงความสามารถที่ของเหลวจะแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ความสามารถในการเปียกที่ดีคือ ของเหลวจะไหลไปครอบคลุมผิวของอนุภาคได้อย่างทุกซอกทุกมุมและเข้าไปแทนที่อากาศได้ดี (ไล่อากาศออกไป) การเปียกจะเกิดขึ้นเมื่อความหนืดของของเหลวไม่สูงเกินไป และการเปียกต้องทำให้พลังงานอิสระของระบบลดลง ซึ่งพิจารณาจากการหยดของเหลวลงบนผิวของแข็ง ฟิล์มบางของของเหลวจะแผ่กระจายไปบนพื้นผิวของแข็งได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับพลังงานอิสระต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของรอยต่อระหว่างของแข็ง-แก๊ส ของเหลว-แก๊ส และของแข็ง-ของเหลว ซึ่งอาจจะเรียกพลังงานอิสระหรือแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดนี้โดยย่อคือ  $\gamma_{SG}$   $\gamma_{LG}$  และ  $\gamma_{SL}$  ตามลำดับ ในกรณีที่ผิวถูกครอบคลุมด้วยฟิล์มของเหลว ฟิล์มของเหลวจะขยายต่อไปเพื่อครอบคลุมพื้นที่เล็ก ๆ นั้นคือการสร้างพื้นผิวรอยต่อระหว่าง ของเหลว-แก๊ส และของแข็ง-ของเหลว เพิ่มขึ้นอีก ดังรูปที่ 2.10 แสดงถึงหยดของเหลวที่เกาะอยู่บนผิวของของแข็งในสภาวะสมดุลซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปียกเกิดขึ้น โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ young's equation ได้ดังสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.10 ของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุลกับของแข็งมีมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $\theta$  โดยที่  $\gamma_{SG}$   $\gamma_{LG}$  และ  $\gamma_{SL}$  เป็นพลังงานผิวอิสระที่รอยต่อระหว่าง ของเหลว-แก๊ส และของแข็ง-ของเหลว ตามลำดับ [17]

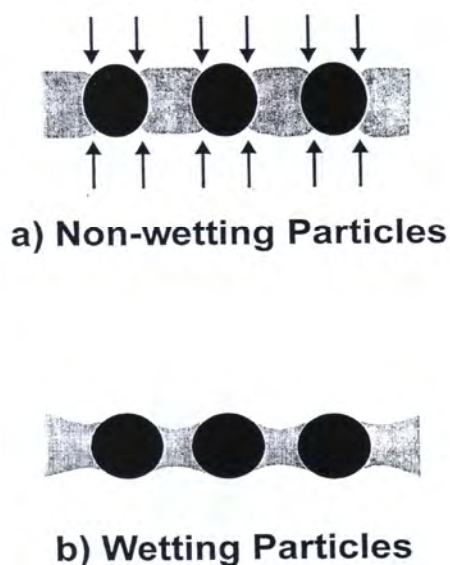
$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta \quad (2.3)$$

โดยที่  $\theta$  คือมุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างระนาบของรอยต่อ  $\gamma_{LG}$  กับรอยต่อ  $\gamma_{SL}$  หรือถ้าปรับสมการในรูปใหม่จะได้

$$\cos\theta = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG} \quad (2.3a)$$

ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับศูนย์ การเปียกที่เกิดขึ้นก็เป็นการเปียกที่สมบูรณ์ (Perfect wetting) ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  หยอดของเหลวจะมีรูปทรงกลมบนผิวของของแข็งเพราะจะมีจุดสัมผัสเพียงจุดเดียว และจะเรียกว่าไม่เกิดการเปียก อาจพิจารณาว่าของเหลวไม่เปียกบนของแข็งเมื่อมีมุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$  [17]

การเปียกที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีผลต่อโฟมอะลูมิเนียมเกี่ยวเนื่องกับในหัวข้อ 2.5 เพราะหากไม่เกิดการเปียกกลไกที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพแก่โฟมอะลูมิเนียมก็จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากอนุภาคไม่ได้ช่วยเพิ่มความหนืดแก่ โฟมอะลูมิเนียม จากการศึกษาของ S.W. Ip et al. [14] พบว่าเมื่อผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมมีความหนาเพิ่มขึ้นเท่ากับขนาดของอนุภาคที่เติมลงไป อนุภาคที่เปียกจะช่วยให้การแตกของฟิล์มเกิดขึ้นช้ากว่าปกติ ในทางตรงกันข้ามอนุภาคที่ไม่เปียกจะลดเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมจากการเหนี่ยวนำให้อะลูมิเนียมบริเวณที่เป็นของเหลวเกิดการแยกตัว (De-wet) รอบๆอนุภาค ดังรูปที่ 2.11 (a) และ (b)

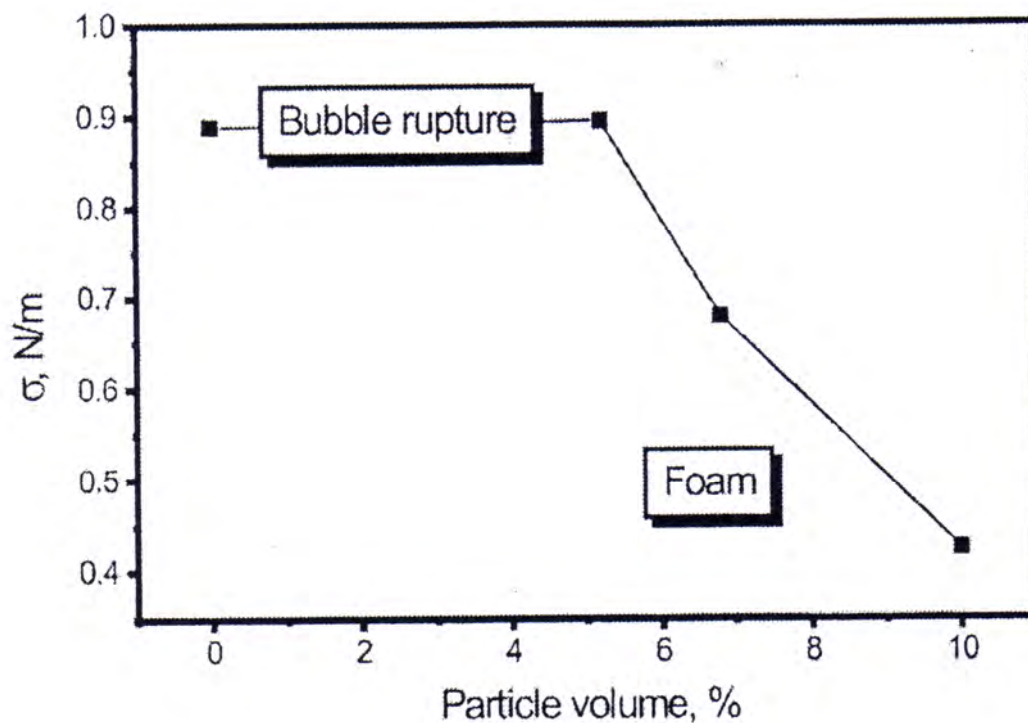


รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบกลไกที่มีต่อเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมระหว่างอนุภาคที่เปียกและไม่เปียก [14]

จากรูปที่ 2.11 (a) ในกรณีของอนุภาคที่ไม่เปียก โฟมอะลูมิเนียมจะเกิดการหดตัวบริเวณที่ถูกรบกวนซึ่งส่งผลให้ฟิล์มเกิดการแตกอย่างรวดเร็ว ส่วนในกรณีของอนุภาคที่เปียก ในรูปที่ 2.11 (b) อนุภาคจะจับโฟมอะลูมิเนียมทำให้เกิดฟิล์มที่มีเสถียรภาพ

### 2.6.3 แรงตึงผิว (Surface tension)

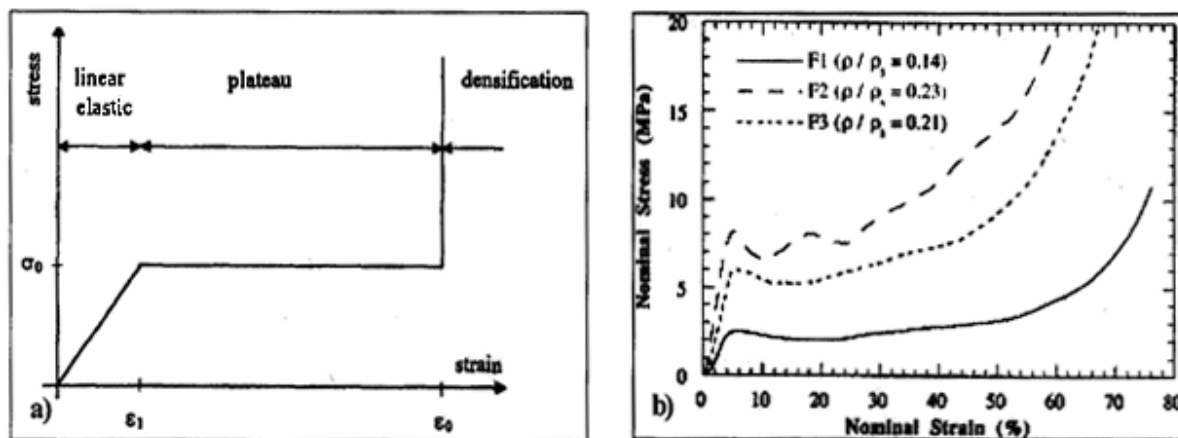
แรงตึงผิวมีผลต่อเสถียรภาพเกี่ยวข้องกับเคลื่อนที่ของโฟมอะลูมิเนียมเพราะแรงตึงผิวที่สูงจะทำให้อนุภาคไม่ยึดเกาะกับอะลูมิเนียมในบริเวณที่เป็นของเหลวจึงไม่ช่วยลดความหนืดทำให้เกิด Drainage ได้ง่าย ดังนั้นการสร้างเสถียรภาพแก่โฟมอะลูมิเนียมอีกทางหนึ่งคือ การลดแรงตึงผิว จากงานวิจัยของ N. Babcsan, et al. [12] พบว่าเมื่อเติมอนุภาค  $Al_2O_3$  มากขึ้นจะช่วยลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่โฟมอะลูมิเนียมเพราะแรงตึงผิวสูงจะทำให้ฟองแตกได้ง่ายกว่าที่แรงตึงผิวต่ำ ดังรูปที่ 2.12



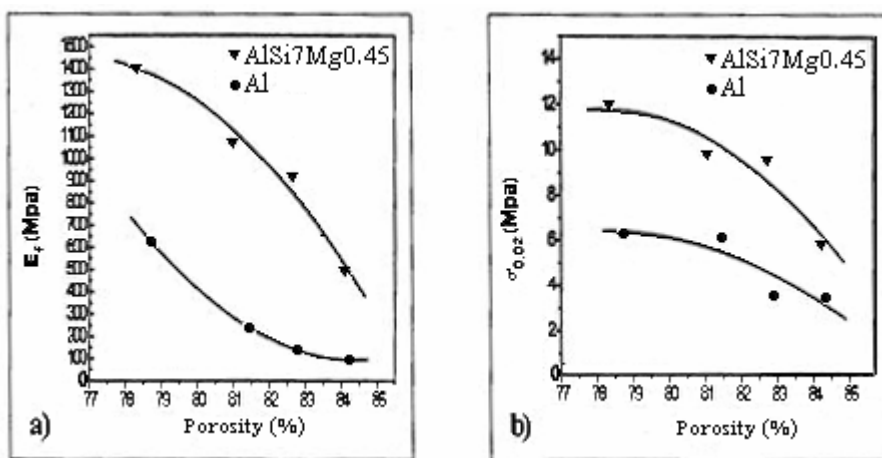
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิว ( $\sigma$ ) กับปริมาณอนุภาค(Particle volume)  $Al_2O_3$  ที่  $700^\circ C$  [12]

## 2.7 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

สำหรับโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด จะมีขั้นตอนการเปลี่ยนกลไกภายใต้แรงอัดที่แตกต่างกัน 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic) บริเวณที่ราบ (Plateau regime) และ การอัดแน่น (Densification) โดยในช่วงต้นที่โฟมเริ่มรับแรงอัดจะเกิดการเปลี่ยนกลไกแบบยืดหยุ่น ซึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้น ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's modulus) และความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) จะลดลงเมื่อมีปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.13 ส่วนรูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของรูพรุนที่มีต่อสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และ โลหะผสม AlSi7Mg0.45

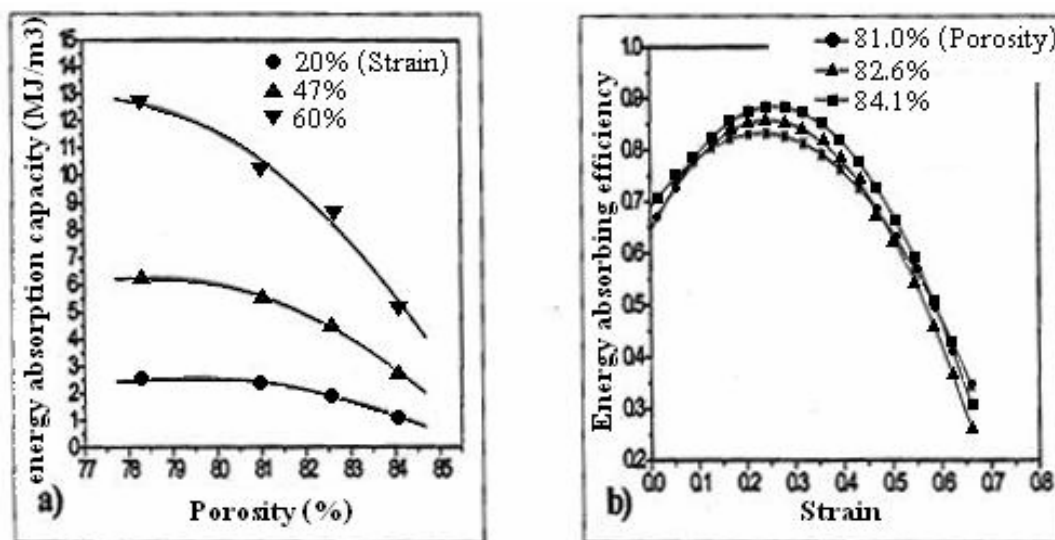


รูปที่ 2.13 กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ของโฟมโลหะชนิดเดียวกัน ; a) โฟมในอุดมคติ และ b) โฟมที่ได้จากการผลิตที่มีสัดส่วนความหนาแน่นแตกต่างกัน 3 ชนิด [18, 19]



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และ โลหะผสม AlSi7Mg0.45 a) สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น b) ความเค้นพิสูจน์ [20]

บริเวณพื้นที่ราบของเส้นกราฟความเค้น-ความเครียด ความเค้นจะมีค่าคงที่ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น สาเหตุเกิดจากการเริ่มเกิดและขยายตัวของแถบการเปลี่ยนรูป (Deformation band) ภายในโฟม และจะเกิดแถบการเปลี่ยนรูปไปจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการอัดแน่นของโฟม ในช่วงสุดท้ายของการเปลี่ยนรูป ความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น รูปร่างของโพรงอากาศที่เปลี่ยนรูปแบบถาวรจะส่งผลให้โพรงอากาศข้างเคียงรับแรงได้น้อยลง นำไปสู่การพังของโพรงอากาศข้างเคียง นอกจากนี้โฟมอะลูมิเนียมยังมีบริเวณที่ราบของกราฟ ความเค้น-ความเครียด ที่ยาวแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากก่อนที่จะเกิดการอัดแน่นจึงเหมาะที่จะใช้เป็นอุปกรณ์ในการรับแรงกระแทก อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับพลังงานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง รูปที่ 2.15a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณรูพรุนของโฟมที่ทำมาจากโลหะผสม AISi7Mg0.45 พบว่าภายใต้ความเครียดเดียวกันความสามารถในการดูดซับพลังงานลดลงเมื่อปริมาณรูพรุนของโฟมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานของโฟมเปลี่ยนแปลงตามระดับของความเครียดอีกด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15b และพบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุดจะขึ้นกับระดับของความเครียดที่แน่นอน



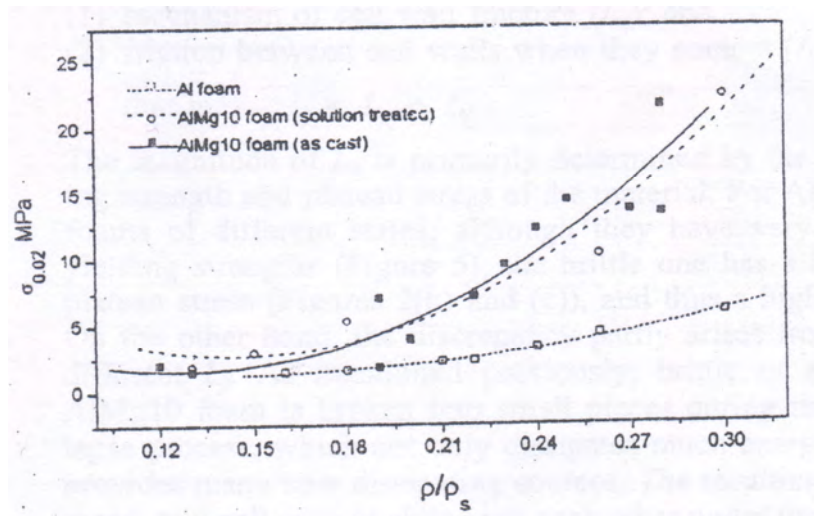
รูปที่ 2.15 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณรูพรุนของโฟม และ b) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับความเครียดของ โลหะผสม AISi7Mg0.45 [20]

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมมีดังต่อไปนี้

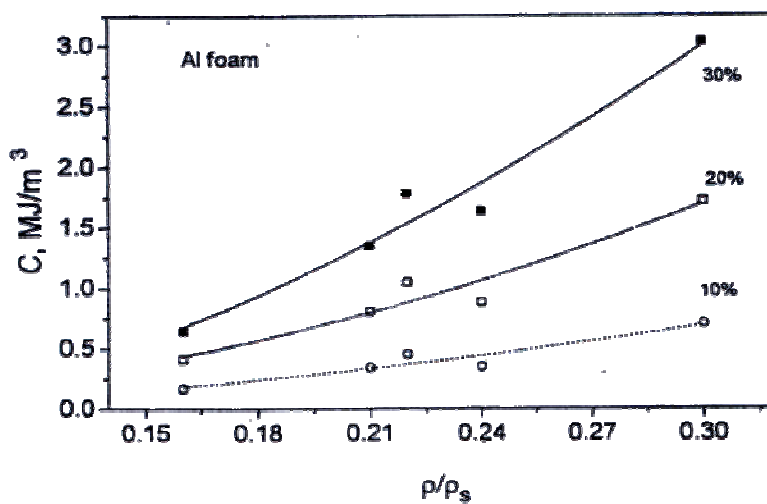


### 2.7.1 ความหนาแน่นของโฟม (Density of foam)

โดยรูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับพฤติกรรมการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีวัสดุเนื้อพื้นที่เป็นโครงสร้างของโฟมมากกว่าทำให้มีการดูดซับและกระจายแรงได้มากกว่า



a)

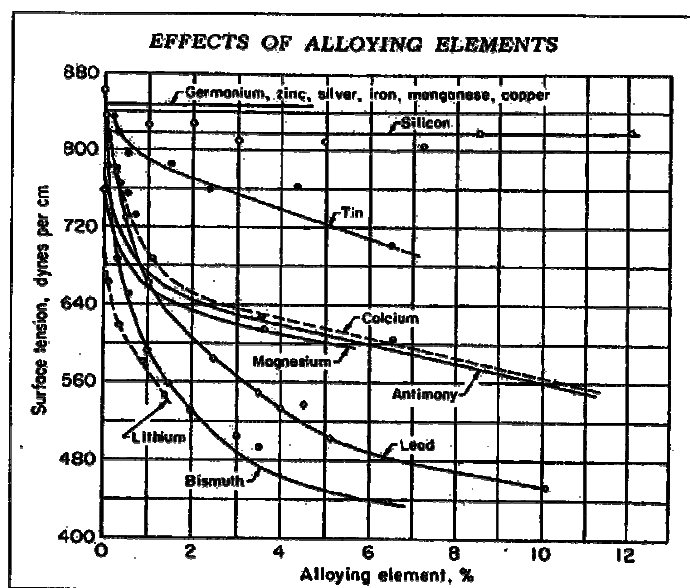


b)

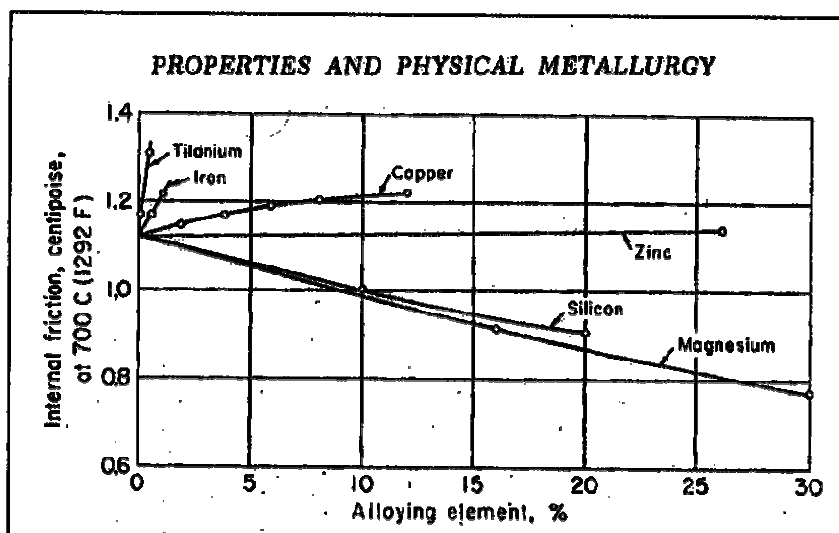
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับ a) ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม และ b) ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม [21]

### 2.7.2 การเติมธาตุผสม (Alloying elements)

ธาตุผสมที่เติมเข้าไปในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีผลต่อแรงตึงผิวและความหนืดของอะลูมิเนียมเหลวในขณะที่ทำการผลิตโฟม เช่น Bi, Ca, Li, Mg, Pb, Sb, หรือ Sn เป็นต้น โดยแรงตึงผิวของอะลูมิเนียมเหลวจะลดลงเมื่อเติมธาตุผสมทำให้การแตกของโพรงอากาศในขณะที่ทำการผลิตโฟมยังเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นโฟมที่ได้จึงมีเสถียรภาพมากขึ้นส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงอัดและดูดซับพลังงานมากขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติม Ag, Cu, Fe, Ge, Mn, Si หรือ Zn จะให้ผลที่ต่างออกไป [3] ดังรูปที่ 2.17 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อแรงตึงผิวของอะลูมิเนียม

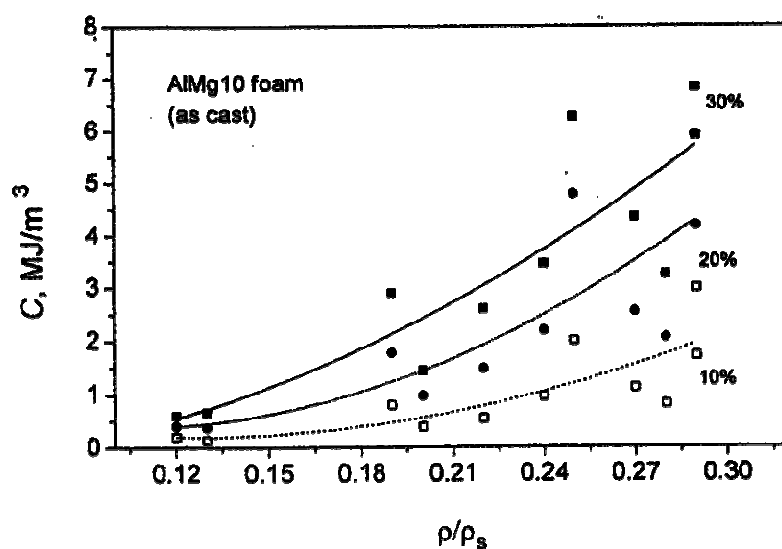


รูปที่ 2.17 ผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงตึงผิวของอะลูมิเนียมเหลว [3]



รูปที่ 2.18 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของอะลูมิเนียมเหลว [3]

การเติม Cu Fe และ Ti จะช่วยเพิ่มความหนืดของอะลูมิเนียมเหลว แต่ความหนืดจะลดลงเมื่อมีการเติม Mg และ Si การเติม Zn จะมีผลต่อความหนืดของอะลูมิเนียมเหลวเพียงเล็กน้อย รูปที่ 2.18 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของอะลูมิเนียมเหลว ด้วยเหตุนี้การเติมอนุภาค Si และ Mg ลงไปจึงมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.16a และจากการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 2.16b กับรูปที่ 2.19 พบว่าเมื่อเติมธาตุผสม โฟมอะลูมิเนียมจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากขึ้น



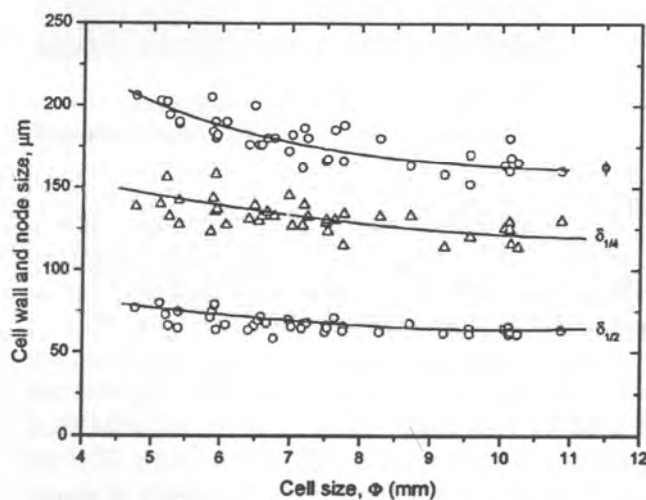
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมที่ทำจากโลหะผสม AlMg10 [21]

### 2.7.3 ปริมาณของโพรงอากาศ (Volume fraction of cells)

โครงสร้างโฟมมีการกระจายของความหนาแน่นที่ไม่ทั่วถึงเท่ากันทั้งโครงสร้างจึงมีผลต่อสมบัติทางกลของโฟม รวมทั้งการดูดซับพลังงานด้วย โดยหากอัตราส่วนของโพรงอากาศมาก หมายความว่าความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้นลดลง ด้วยเหตุนี้ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานจึงลดลงด้วยดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7.1 อีกทั้งยังสามารถบ่งบอกถึงการกระจายตัวของโพรงอากาศได้อีกด้วย ซึ่งค่าอัตราส่วนของโพรงอากาศที่มากหมายถึงการกระจายตัวที่ดีของโพรงอากาศ โดยยังไม่พิจารณา ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศ [22]

### 2.7.4 ขนาดของโพรงอากาศ (Cell size)

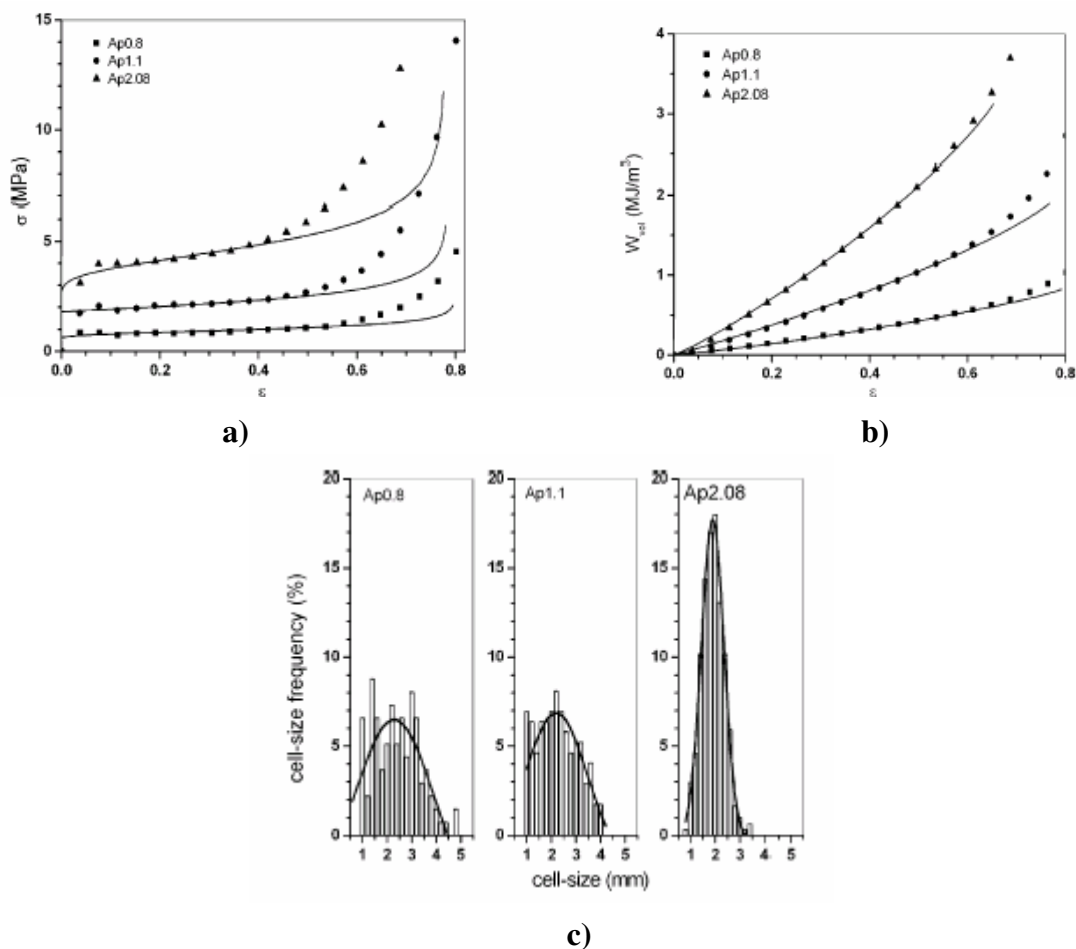
ขนาดของโพรงอากาศส่งผลต่อความแข็งแรงอัดแต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงเกรง (Stiffness) และการแตกหักแบบยืดหยุ่น (Fracture toughness) โดยเฉพาะหากใช้เป็นตัวเปลี่ยนถ่ายความร้อน (Heat exchangers) จะส่งผลมากกว่าการนำโฟมไปใช้ในงานโครงสร้าง และจากการศึกษาของ W. Deqing, et al. [23] พบว่า ขนาดของโพรงอากาศที่เล็กจะมีความหนาของผนังโพรงอากาศที่หนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าดังแสดงในรูปที่ 2.20 เนื่องจากโครงสร้างของโพรงอากาศที่แข็งแรงกว่านี้เองจึงทำให้สามารถที่จะรับแรงอัดก่อนที่จะมีการเสียรูปและแตกหักได้มากกว่า ยิ่งไปกว่านั้นผนังโพรงอากาศที่บางกว่าในกรณีที่มีขนาดโพรงอากาศใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความหนาแน่นเดียวกันนั้นจะเกิดรอยพับและรอยแตก (Cracks) ได้ง่ายกว่า เนื่องจากความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) ทั้งนี้เพราะโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิดเมื่อได้รับแรงอัดจะเกิดการโก่งตัว (Buckling) ของผนังโพรงอากาศ และเกิดการยืดขยายบนผิวของผนังโพรงอากาศ ดังนั้นการควบคุมขนาดของโพรงอากาศให้มีขนาดที่เหมาะสม ดังที่ L.J. Gibson [22] แนะนำไว้ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 10 mm จะเป็นการควบคุมความหนาของผนังโพรงอากาศไปด้วย



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับความหนาผนังโพรงอากาศ [23]

### 2.7.5 การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ (Cell-size distribution)

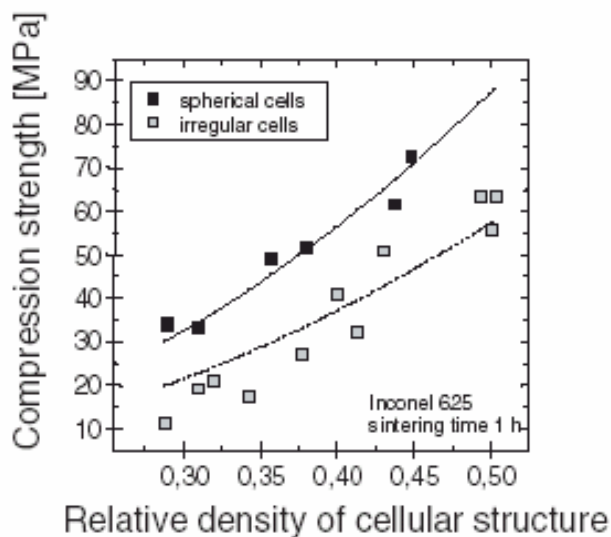
จากงานวิจัยของ P. Kenesei, et al. [24] พบว่า การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศที่น้อยหรือมีขนาดที่สม่ำเสมอทั่วทั้งโฟมจะมีค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานที่มากกว่าโฟมที่มีการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศมาก ดังรูปที่ 2.21 เพราะโพรงอากาศที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอขณะที่รับความเค้นจะเกิดความไม่สมดุลของแต่ละบริเวณจึงรับความเค้นและดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า



รูปที่ 2.21 แสดง a) ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงอัดกับการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ b) ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับพลังงานกับการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ c) การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ [24]

### 2.7.6 รูปร่างของโพรงอากาศ (Cell shape)

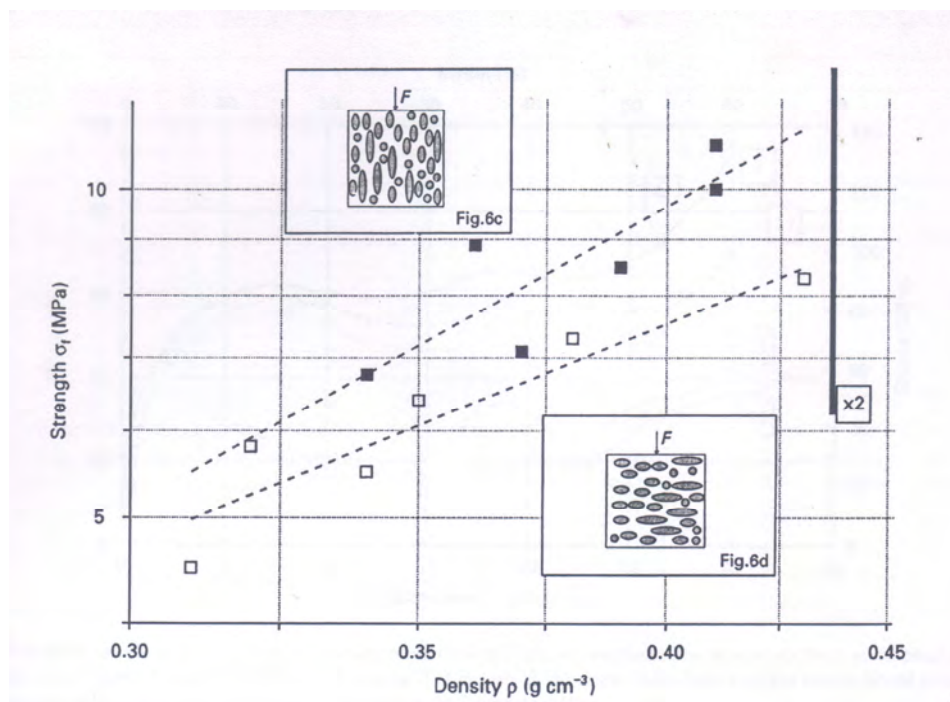
ในทางทฤษฎีโพรงอากาศจะมีรูปร่างในอุดมคติเป็นแบบ polyhedral แต่ในความเป็นจริงโพรงอากาศของโฟมโลหะมีรูปร่างที่แตกต่างกันแม้จะอยู่ในชิ้นงานเดียวกันก็ตาม ซึ่งจากรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าโพรงอากาศที่มีลักษณะกลมจะมีความแข็งแรงอัดมากกว่าโพรงอากาศที่มีลักษณะไม่แน่นอน เนื่องจากโพรงอากาศที่มีลักษณะไม่แน่นอนจะมีความเข้มข้นของความเค้นสูงบริเวณขอบเหลี่ยมมุมทำให้เกิดการแตกหักหรือเสียหายได้ง่ายกว่าเมื่อรับแรงเท่ากับโพรงอากาศที่มีลักษณะกลม [25]



รูปที่ 2.22 แสดงผลของรูปร่างโพรงอากาศต่อความแข็งแรงอัด [25]

### 2.7.7 ทิศทางของโพรงอากาศ (Cell orientation)

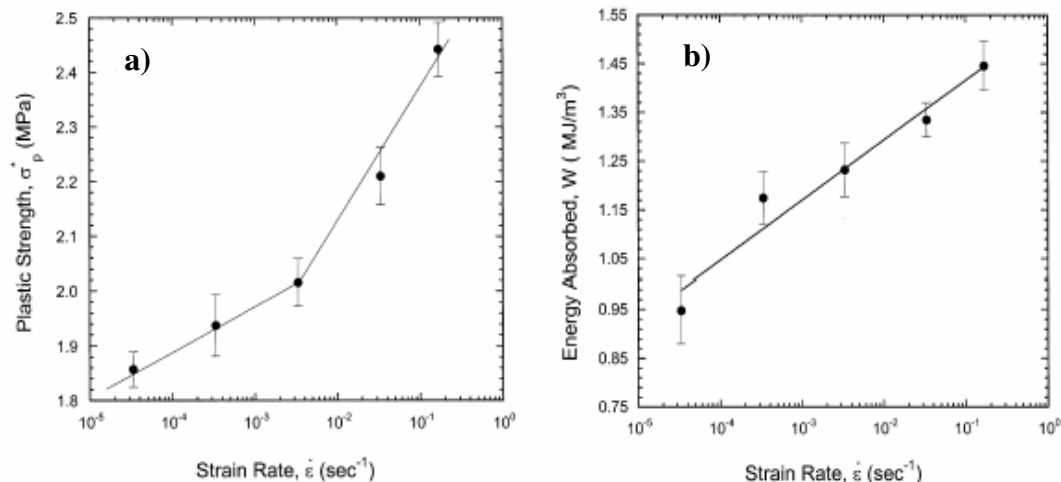
เมื่อได้รับความเค้นในทิศทางขนานกับทิศทางในการผลิตโฟม พบว่ามีความแข็งแรงอัดสูงกว่ารับแรงในทิศทางตั้งฉากกับการผลิตโฟม ดังรูปที่ 2.23 เนื่องจากพื้นที่ในการสัมผัสแรงในทิศทางขนานกับการผลิตมีน้อยกว่าในทิศตั้งฉากทำให้ความเค้นมีค่าสูงกว่าที่แรงเท่ากัน นอกจากนี้ระยะในการเสียรูปของโพรงอากาศในทิศทางขนานกับชิ้นงานยังมีมากกว่าด้วยจึงทำให้มีการดูดซับพลังงานที่มากกว่า [26]



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางในการรับแรงกับความแข็งแรงอัด [26]

### 2.7.8 อัตราความเครียด (Strain rate)

โดยที่อัตราความเครียดต่ำจะเกิดการโก่งตัวของผนังโพรงอากาศซึ่งเป็นกลไกที่เกิดขึ้นเป็นปกติในวัสดุโฟม อย่างไรก็ตามที่อัตราความเครียดที่สูงมาก ๆ การโก่งตัวจะถูกต้านโดยแรงเฉื่อย (Inertia) ของผนังโพรงอากาศซึ่งจะช่วยเพิ่มความเค้นจุดครากด้วย [27] ดังแสดงในรูปที่ 2.24 นอกจากนี้ขณะที่ได้รับความเค้น แก๊สที่ไหลระหว่างโพรงอากาศผ่านจุดบกพร่องที่เกิดระหว่างกระบวนการผลิตในผนังโพรงอากาศทำให้แรงดันแก๊สภายในโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้นระหว่างที่เพิ่มอัตราความเครียด ส่งผลให้เกิดความเครียดเฉพาะที่ขึ้นความเค้นพลาโตและการดูดซับพลังงานจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับ a) ความแข็งแรงอัดและ b) การดูดซับพลังงาน [27]

### 2.7.9 จุดบกพร่อง (Defect)

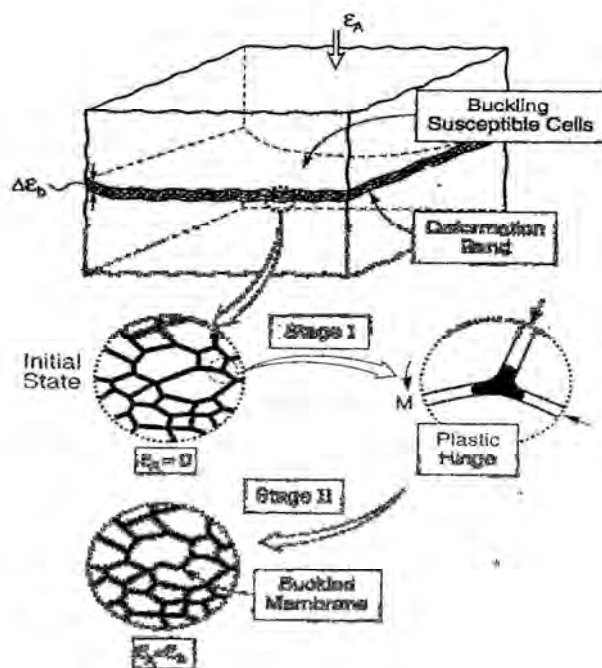
จุดบกพร่องจะเกิดระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การบิดของผนังโพรงอากาศ ความหนาของผนังโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ ช่องว่างในผนังโพรงอากาศ และการผิดรูปของโพรงอากาศ เป็นต้น รวมทั้งที่เกิดจากการไหลของอะลูมิเนียมเหลวและการหดตัวขณะเย็นตัว เช่น การแตกของโพรงอากาศและความหนาที่เพิ่มขึ้นของผนังโพรงอากาศ ซึ่งจุดบกพร่องเหล่านี้จะทำให้ความแข็งแรงของโฟมลดลง โดยจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียรูปเนื่องจากเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุด



รูปที่ 2.25 แสดง โครงสร้างโฟมโลหะที่มีจุดบกพร่อง [28]



2.7.10 กลไกที่เกิดขึ้นขณะรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด  
(Compression mechanism) แบ่งเป็นสามขั้นตอนดังนี้ [29]



รูปที่ 2.26 แสดงกลไกการเสียรูปขณะรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม [29]

ขั้นที่ 1) ไม่พบบริเวณที่มีแนวโน้มที่จะเกิดความเครียดสูง (Strain concentration) หรือการบิดของโพรงอากาศ (Cell distortion) แต่เกิดการเสียรูปบริเวณโหนด (Node) บนผิวของโฟมอะลูมิเนียมซึ่งบริเวณผิวนี้จะเกิดความเค้นดกค้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.26 แต่ผลของความเค้นบริเวณผนังโพรงอากาศอาจไม่เด่นชัดนักเนื่องจากเกิด Stress relaxation ในจุดบกพร่องต่างๆ (Defect) ได้แก่ รอยแตก (Crack) หรือความบกพร่องที่เกิดจากการบิด ทำให้การกระจายตัวของแรงไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญในการลดประสิทธิภาพของโฟมอะลูมิเนียมในการใช้เป็นแกนกลางหรือเป็นวัสดุประกอบ (Composite material)

ขั้นที่ 2) เกิดการบิดของโพรงอากาศขึ้นดังนี้ (i) การโค้งงอเกิดอย่างรวดเร็วตลอดแถบของผนังโพรงอากาศและเกิดความเครียด (ii) เกิดการคดตัว (Bending) ในผนังโพรงอากาศที่มีความไวสูง แม้ว่าในกลไกนี้ยังไม่เกิดการยุบตัวแบบถาวร (Plastic collapse) แต่โพรงอากาศที่ไวต่อการบิดมากที่สุดจะมีโครงสร้างลักษณะเป็นวงรี และมีรอยบิดโค้ง ซึ่งการโค้งงอของผนังโพรงอากาศจะเหนี่ยวนำให้เกิดความเข้มข้นของความเครียด (Strain concentration) ในโพรงอากาศข้างๆเป็นสาเหตุให้เกิดการบิดขึ้นนั่นเอง

ขั้นที่ 3) แถบที่เกิดการบิดในขั้นที่ 2 เกิดการยุบตัวจนหมดทำให้เกิด Strain concentration ในโพรงอากาศข้างๆ เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นจึงทำให้โพรงอากาศข้างๆยุบตัวต่อไปเรื่อยๆจนหมดทั้งชิ้นโฟมอะลูมิเนียม

## 2.8 พฤติกรรมการรับแรงอัดของวัสดุผสมประเภทผงอนุภาคเนื้อพื้นโลหะ

การเติมอนุภาคเซรามิกลงไปเนื้อพื้นโลหะจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงอัดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่ไม่ได้เสริมแรงเนื่องมาจากอนุภาคเซรามิกมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะ โดยที่สมดุลหรือไม่มีจุดบกพร่อง ความเค้นที่ให้กับวัสดุผสมจะมีค่าเท่ากับผลรวมของความเค้นที่อนุภาคและเนื้อพื้นได้รับดังสมการ

$$(1 - f)\sigma_M + f\sigma_p = \sigma^A \quad (2.4)$$

โดย  $\sigma_M$  และ  $\sigma_p$  แทนความเค้นของเนื้อพื้นและอนุภาคเซรามิกที่ได้รับ ตามลำดับ และ  $\sigma^A$  เป็นความเค้นที่วัสดุผสมได้รับ ส่วน  $f$  แทนอัตราส่วนปริมาตรของอนุภาคเซรามิก ซึ่งเวลาที่วัสดุผสมได้รับแรงทำให้วัสดุเนื้อพื้นเกิดการเปลี่ยนรูปก่อนอนุภาคเซรามิก เนื่องจากมีความแข็งแรงน้อยกว่าหรือมีค่าความเค้นจุดครากต่ำกว่าอนุภาคเซรามิกซึ่งเนื้อพื้นบริเวณโดยรอบอนุภาคเซรามิกเกิดการเปลี่ยนรูปไปด้วยส่งผลให้เกิดความเครียดเนื่องจากความไม่พอดี (Misfit strain) จากนั้นจึงถ่ายเทความเค้นให้แก่อนุภาคเซรามิกช่วยรับ [5] นอกจากนี้อนุภาคเซรามิกจะสามารถช่วยรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากแค่ไหนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

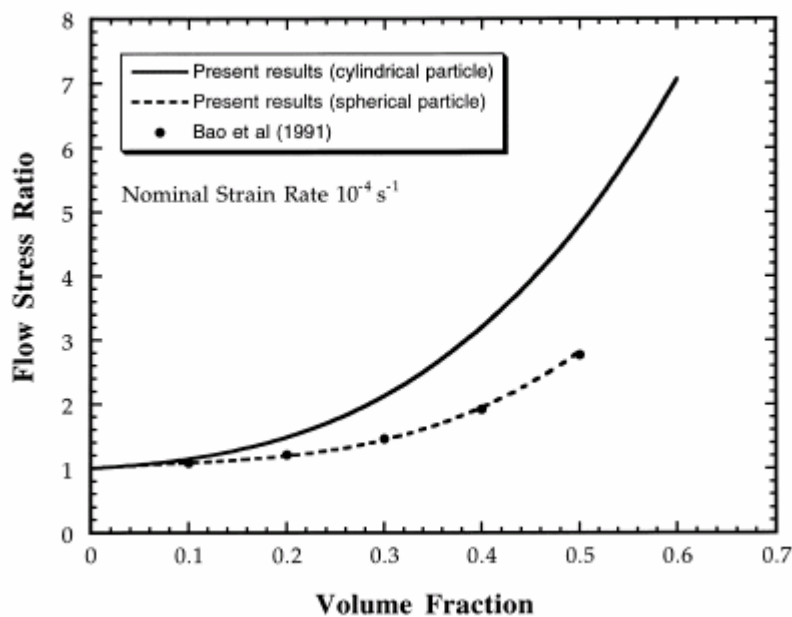
### 2.8.1 รอยต่อระหว่างเนื้อพื้นกับตัวเสริมแรง (Reinforcement-Matrix interface)

แรงกระทำที่เกิดขึ้นที่เนื้อพื้นจะต้องถูกส่งผ่านไปยังตัวเสริมแรงโดยอาศัยเส้นทางรอยต่อระหว่างกันดังนั้นถ้าตัวเสริมแรงมีพันธะยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงมากกับเนื้อพื้น ก็จะทำให้ความแข็งแรงที่สูงของอนุภาคเซรามิกเพิ่มสมบัติของวัสดุผสมได้เต็มที่ นอกจากนี้พฤติกรรมการแตกหักของวัสดุผสมก็จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงรอยต่อ (interface) ด้วย ถ้ารอยต่ออ่อนแอส่งผลให้ความแข็งแรงต่ำและโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำแต่จะมีความต้านทานต่อการแตกหักสูง ขณะที่ถ้ารอยต่อแข็งแรงก็มีผลให้ค่าความแข็งแรงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงแต่ความต้านทานต่อการแตกหักต่ำหรือชิ้นงานมีพฤติกรรมการแตกแบบเปราะ ในบางกรณีเฟสที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อซึ่งอาจจะมาจากปฏิกิริยาระหว่างเนื้อพื้นกับตัวเสริมแรง แม้ว่าจะมีความหนาเพียงไม่กี่อะตอม แต่ก็ส่งผลให้สมบัติของวัสดุผสมแตกต่างจากเดิมไปมากได้ ดังนั้นที่บริเวณรอยต่อดังกล่าวนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความไม่สม่ำเสมอทาง

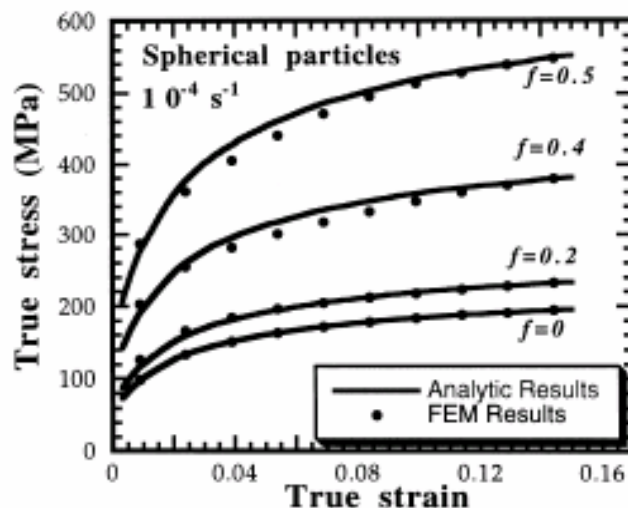
เคมี พลิก และโครงสร้าง โมเลกุลรวมถึงสมบัติทางกลและสมบัติอื่นๆ หรือแม้แต่ความหยาบของตัวเสริมแรง ถ้ามีช่องว่างหรือช่องอากาศมาก (เนื่องจากผิวของตัวเสริมแรงหยาบเกินไป) ก็จะได้รอยต่อที่ไม่แข็งแรง หรือมีการปนเปื้อนเกิดขึ้นก็ให้ผลที่ไม่ดีต่อความแข็งแรงของการประสาน นอกจากนี้ต้องดูว่าการประสานตรงจุดที่สัมผัสมีความแข็งแรงมากน้อยเพียงใด เพราะจะส่งผลต่อความยากง่ายในการสูญเสียการยึดเหนี่ยว (Debonding) และการหลุดของอนุภาคเซรามิกจากเนื้อพื้นในช่วงการขยายตัวของรอยแตกหัก [17]

## 2.8.2 ปริมาณอนุภาค (Particle volume fraction)

จากงานวิจัยของ Y. Li, et al. [30] พบว่าเมื่อเติมอนุภาคในปริมาณมากขึ้นจะทำให้เกิดการไหลของความเค้นมากขึ้นดังรูปที่ 2.27 เนื่องจากเมื่ออนุภาคมีปริมาณมากขึ้นการถ่ายเทความเค้นจะถ่ายเทจากอนุภาคหนึ่งไปอีกอนุภาคหนึ่งผ่านจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นเนื้อพื้นน้อยลง ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นของความเค้นจึงมีมากขึ้นบริเวณอนุภาคจึงช่วยรับแรงได้มากขึ้นด้วย [31] ดังรูปที่ 2.28



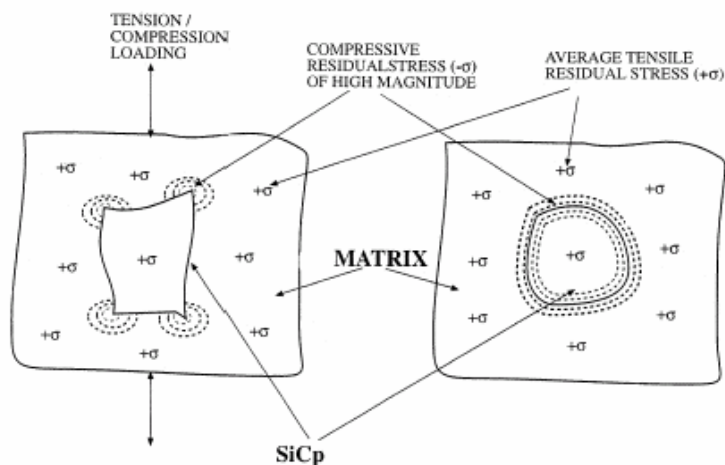
รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบการไหลของความเค้นกับปริมาณอนุภาค [30]



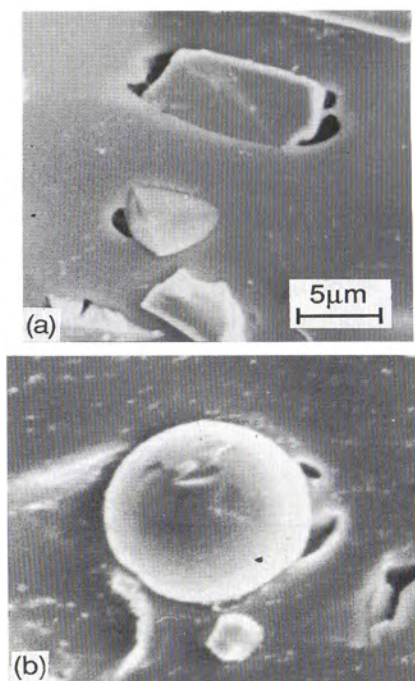
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับปริมาณอนุภาค [30]

### 2.8.3 รูปร่างของอนุภาค (Particle shape)

ส่งผลต่อความแข็งแรงอัดในลักษณะที่แตกต่างกันเพราะจากรูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นตกค้างเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion) ที่แตกต่างกันระหว่างเนื้อพื้นโลหะกับอนุภาคเซรามิก โดยอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม (Angular) เมื่อได้รับแรงจะเกิดความเค้นตกค้างบริเวณมุมเป็นหลัก ต่างจากในกรณีที่อนุภาคมีลักษณะค่อนข้างกลม (round) ที่ความเค้นตกค้างเกิดขึ้นบริเวณโดยรอบอนุภาคทำให้การรับแรงมีความสม่ำเสมอมากกว่า ดังนั้นเมื่อมีการรับแรงอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมจึงเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่า อีกทั้งการเกิดและขยายตัวของช่องว่าง (Void) ที่จะขัดขวางการถ่ายเทแรงจากเนื้อพื้นไปยังอนุภาคมีมากกว่าอนุภาคที่มีลักษณะค่อนข้างกลม ดังรูปที่ 2.30 ทำให้อนุภาคที่มีลักษณะกลมกว่าลดความเค้นเฉพาะที่ (Local stress) ได้มากกว่าอีกด้วย ด้วยเหตุนี้อนุภาคที่มีลักษณะทรงกลมจึงสามารถช่วยวัสดุผสมรับแรงได้มากกว่า [32, 33]



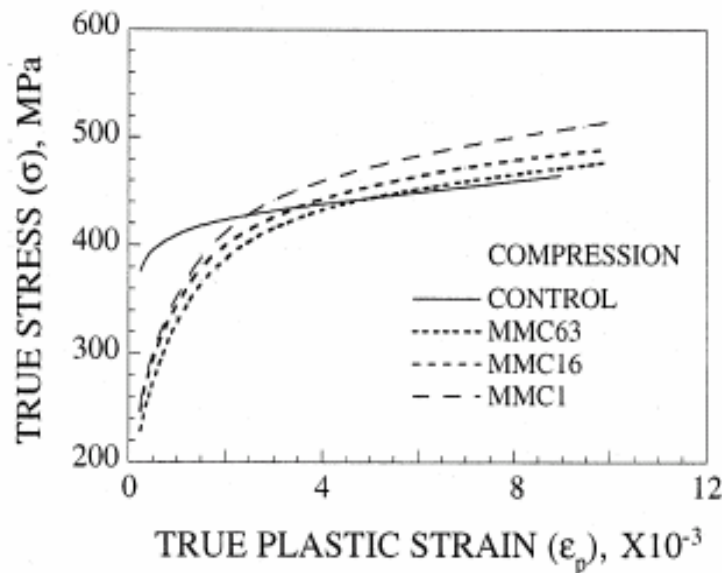
รูปที่ 2.29 แสดงความเค้นตกค้างบริเวณโดยรอบอนุภาคเซรามิก [32]



รูปที่ 2.30 แสดงช่องว่างและลักษณะการเกาะตัวของอนุภาค a) มีเหลี่ยมมุม และ b) วงกลม [33]

#### 2.8.4 ขนาดของอนุภาค (Particle size)

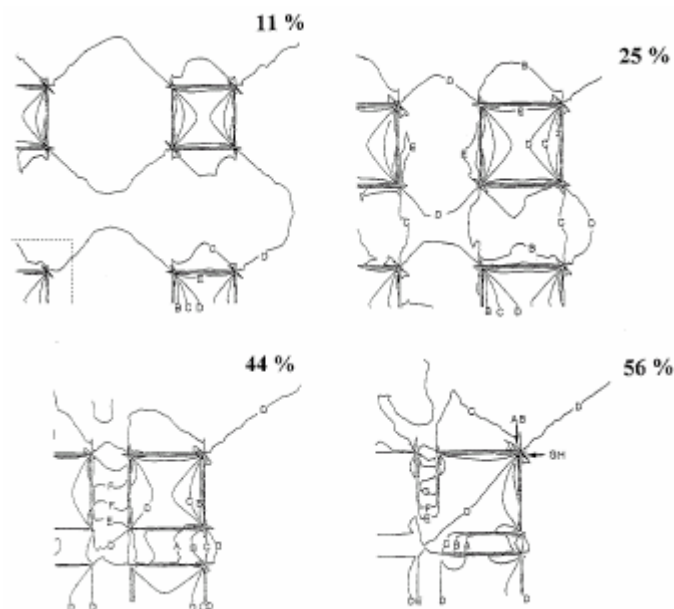
เนื้อพื้นที่เติมอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะเกิดการแตกของอนุภาคได้ง่ายกว่า โดยอนุภาคมีขนาดเล็กและกระจายอยู่ทั่วในเนื้อพื้นสามารถจัดเป็นตัวเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากที่น้ำหนักเท่ากันมีจำนวนอนุภาคที่สามารถรับและกระจายแรงได้มากกว่าอนุภาคที่ใหญ่กว่า [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดแรงอัดของวัสดุผสมอนุภาคขนาดต่างๆ [32]

### 2.8.5 การกระจายตัวของอนุภาค (Particle distribution)

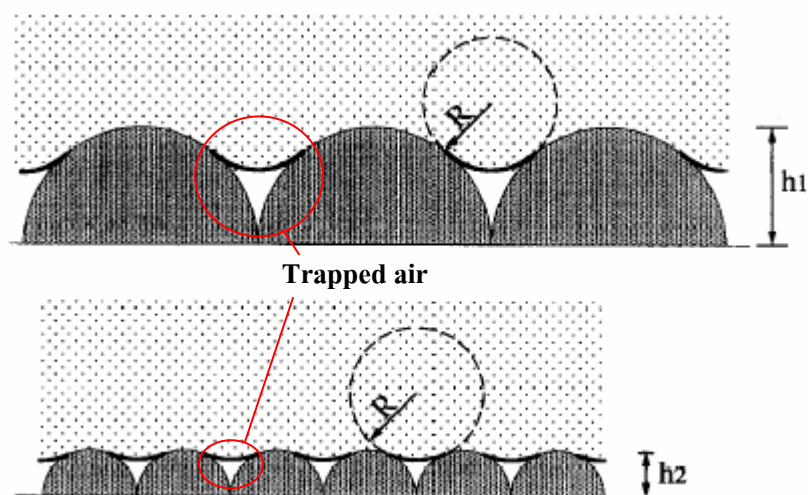
หากในวัสดุผสมมีการเกาะกลุ่มกัน (Cluster) มากขึ้นซึ่งหมายความว่า การกระจายตัวของอนุภาคน้อยลงทำให้การไหลของความเค้นมีค่ามากขึ้น และในบริเวณที่มีการเกาะกลุ่มกันจะมีความเค้นที่สูงทั้งในเนื้อพื้นและตัวอนุภาคจึงแสดงให้เห็นว่าอนุภาคไม่ได้ช่วยรับแรงเท่าที่ควร เนื่องจากอนุภาคที่อยู่ด้านนอกจะมีการรับแรงเฉพาะที่มากกว่าบริเวณตรงกลางของกลุ่มอนุภาคทำให้อนุภาคที่อยู่ตรงกลางกลุ่มไม่ได้ช่วยในการรับแรง ดังรูปที่ 2.32 แสดงให้เห็นว่าความเค้นแรงอัดสูงสุดอยู่บริเวณมุมของอนุภาคที่อยู่บริเวณมุมของกลุ่มอนุภาคและยังพบความเค้นแรงดึง (Tensile stress) ในทิศทางตั้งฉากกับแรงอัดทำให้เกิดการแตกหักที่จุดบัพพร้อมของอนุภาค ยังมีการเกาะกลุ่มกันมากยิ่งขึ้นทำให้เกิดการแตกหักของอนุภาคได้ง่ายขึ้น [34]



รูปที่ 2.32 เปรียบเทียบความเค้นจากการเกาะกลุ่มในปริมาณต่างๆกัน โดย A = -400 MPa, B = -300 MPa, C = -200 MPa, D = -100 MPa, E = 100 MPa, F = 200 MPa, G = 300 MPa, H = 400 MPa [34]

### 2.8.6 ความหยาบของผิวอนุภาค (Surface roughness of particles)

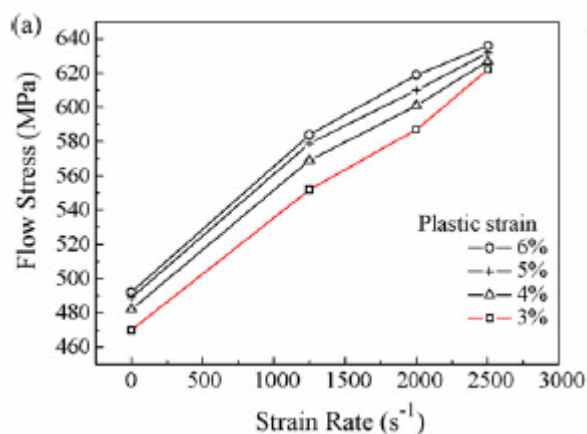
มีผลต่อความสามารถในการเปียกซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงระหว่างรอยต่อและอนุภาคเซรามิกด้วย โดยอนุภาคเซรามิกที่มีผิวที่หยาบกว่าจะเก็บกักอากาศไว้ได้มากกว่าทำให้โลหะเนื้อพื้นมีจุดสัมผัสโดยตรงกับอนุภาคน้อยลง [35] ดังรูปที่ 2.33 ดังนั้นเวลาที่ได้รับความเค้นจึงส่งผลให้วัสดุเนื้อพื้นถ่ายเทความเค้นมายังอนุภาคเซรามิกได้ไม่เต็มที่



รูปที่ 2.33 แสดงอากาศที่ถูกเก็บกักในพื้นผิวที่หยาบ [35]

### 2.8.7 อัตราความเครียด (Strain rate)

จากการศึกษาของ Z.H. Tan, et al. [31] พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดจะทำให้การไหลของความเค้นเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 2.34 เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดจะเกิดความร้อนในวัสดุผสมมากขึ้น โดยเฉพาะในเนื้อพื้นโลหะซึ่งมีการนำความร้อนที่ดีกว่าในอนุภาคเซรามิกจึงทำให้เนื้อพื้นเกิดการหลอมตัว การรับความเค้นจึงอยู่ที่อนุภาคเซรามิกเป็นหลัก

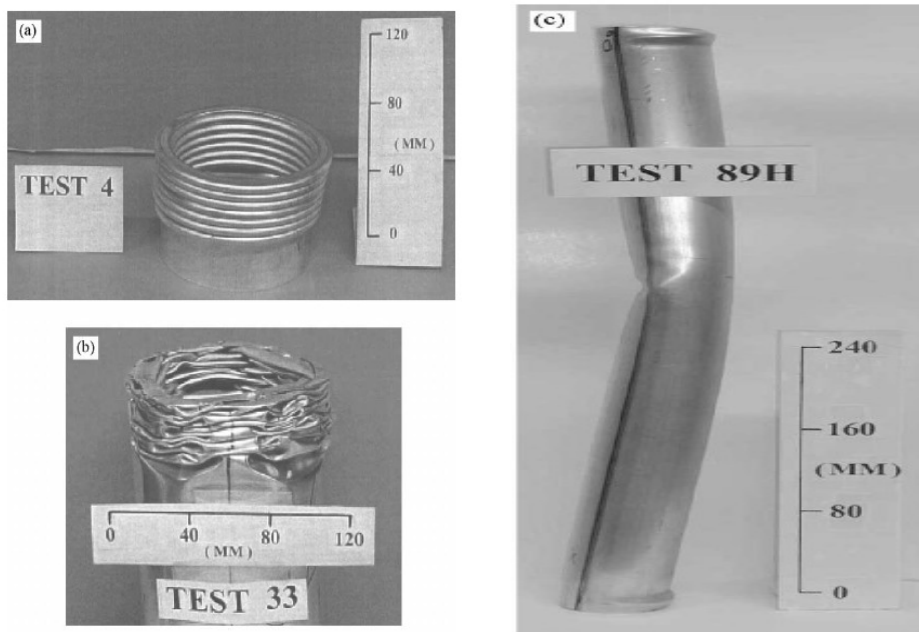


รูปที่ 2.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความเค้นและอัตราความเครียดที่ความเครียดต่างๆกัน [31]

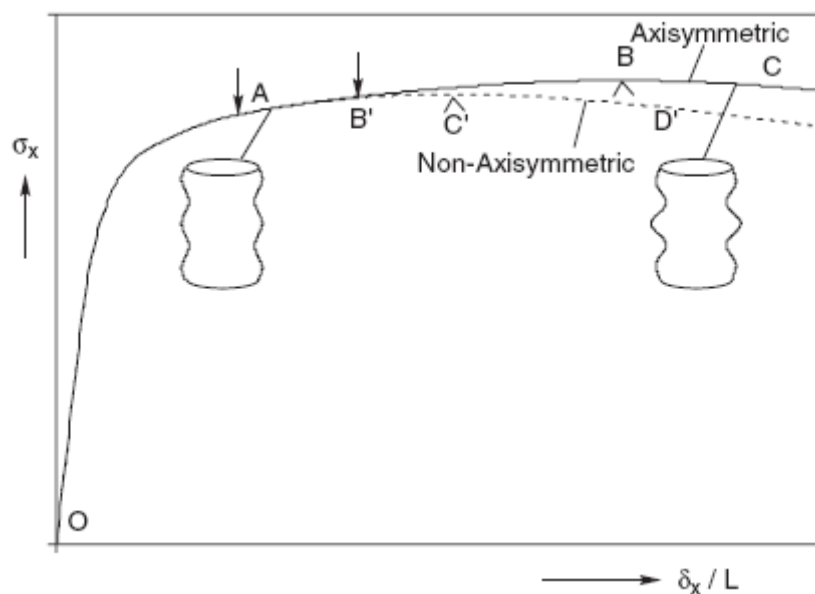
### 2.9 พฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อเปล่า

พฤติกรรมการรับแรงอัดของท่อเปล่าจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของท่อ (Geometry) รวมไปถึงสมบัติของวัสดุอีกด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปการเสีรูปร่างจะแบ่งเป็นการโก่งตัวแบบถาวร (plastic buckling) และการเกิดรอยพับซึ่งสามารถแยกประเภทได้ดังนี้ 1. แบบสมมาตร (Axisymmetry) 2. แบบไม่สมมาตร (Non-axisymmetr) 3. แบบผสม (Mixed mode) 4. การโก่งตัวโดยรวม (Global buckling) 5. อื่นๆ (Simple compression, single fold) โดยจากการศึกษาของ S.R. Guillow, et al. [36] ในการทดสอบแรงอัดของท่ออะลูมิเนียมกลมพบความสัมพันธ์ของกลไกการเสีรูปร่างดังแสดงรูปที่ 2.35 และ F.C. Bardi, et al. [37] ศึกษาการโค้งงอของท่อกลมพบว่าการเสีรูปร่างแบบสมมาตรในตอนแรกจะเปลี่ยนเป็นแบบไม่สมมาตรก่อนที่จะถึงขีดจำกัดของแรงอัด (Limit load) ซึ่งพบรอยพับ 2-3 รอยพับทำให้การเสีรูปร่างมีขีดจำกัดดังรูปที่ 2.36





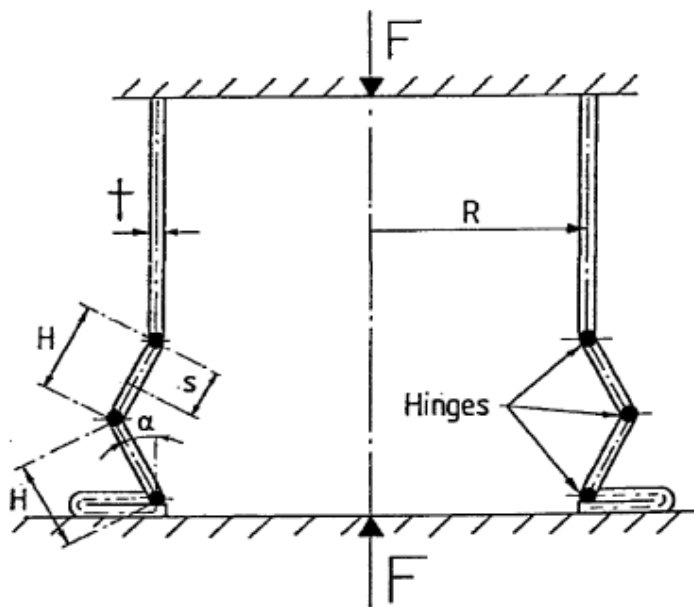
รูปที่ 2.35 แสดงกลไกการพับตัวของท่อแบบต่างๆ a) แบบสมมาตร b) แบบไม่สมมาตร c) การโค้งโดยรวม [36]



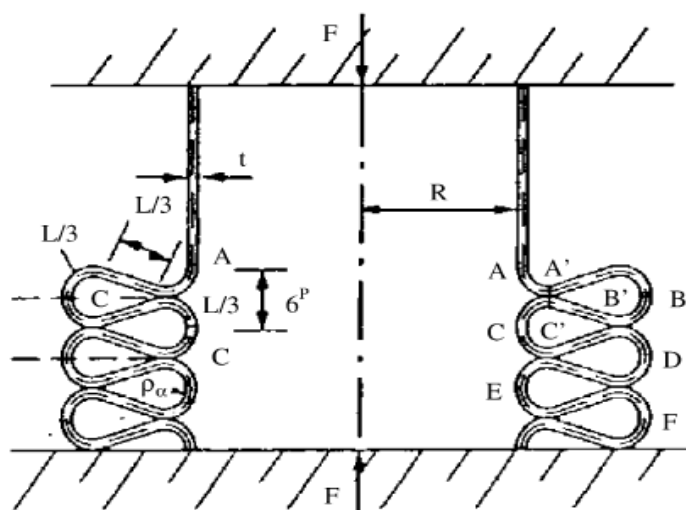
รูปที่ 2.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียดที่มีต่อลักษณะการเสียรูป [37]

Alexander, et al. [38] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับท่อโลหะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) เท่ากับ 29-89 พบว่างานภายนอกที่กระทำต่อท่อเท่ากับงานภายในทำให้เกิดการโค้งตัวแบบ 3 จุดดังแสดงในรูปที่ 2.37 ซึ่งต่อมา Brzebieta, et al. [39] ได้ใช้วิธีการที่เรียกว่า Strip mode ในการ

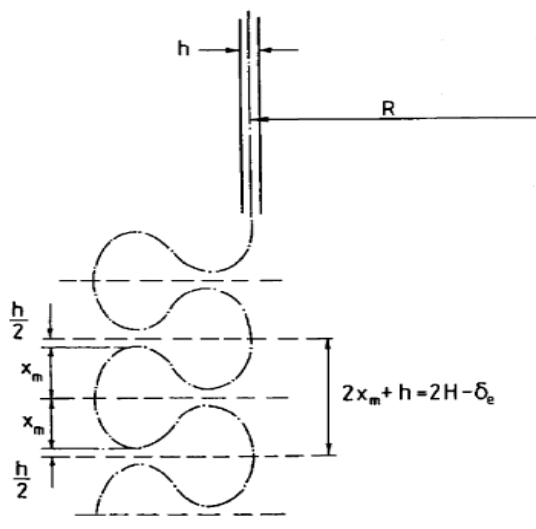
วิเคราะห์การเสียรูปแบบสมมาตร โดยพบรอยพับประกอบด้วยความยาวที่เท่ากัน 3 ระยะ ซึ่ง 2 ระยะในนั้นมีรัศมีความโค้งเท่ากันและระยะสุดท้ายเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.38 ส่วน Abramowicz, et al. และ Jones, et al. [40] ทำการทดสอบแรงอัดของท่อเหล็กกลมและท่อเหล็กสี่เหลี่ยมจัดรูปพบว่า รอยพับประกอบด้วยรัศมีที่มีความยาวเท่ากัน 2 ช่วงยาว  $H$  ลักษณะของเส้นโค้งอยู่ในทิศทางข้างดั่งแสดงในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.37 แสดงแบบจำลองกลไกการเสียรูปแบบสมมาตรของ Alexander [38]

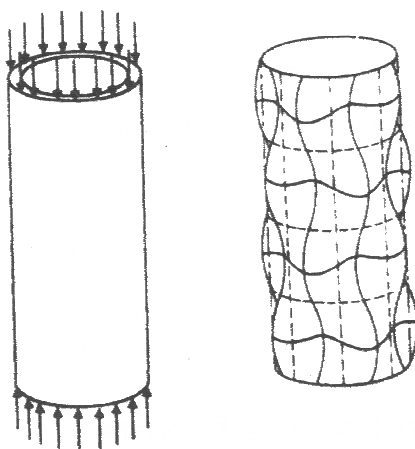


รูปที่ 2.38 แสดงแบบจำลองกลไกการเสียรูปแบบสมมาตรของ Brzebieta [39]



รูปที่ 2.39 แสดงแบบจำลองกลไกการเสถียรแบบสมมาตรของ Abramowicz และ Jones [40]

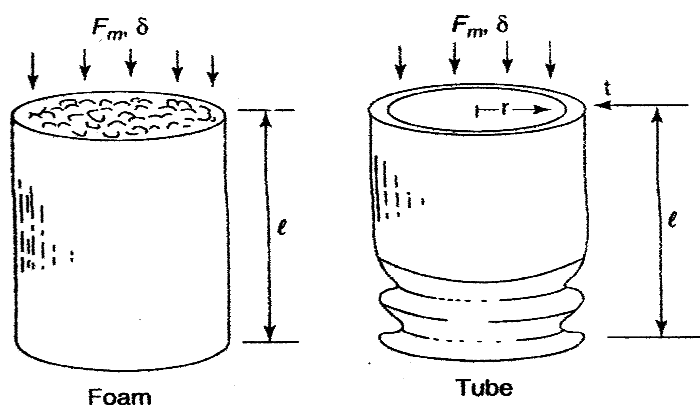
ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อเปล่า ได้แก่ ขนาด รูปร่างและน้ำหนัก โดยมีผลต่อกลไกการโค้งงอซึ่งมีหลายกลไกเกิดขึ้นอยู่กันว่า กลไกใดจะมีอิทธิพลมากกว่ากันในการรับแรงอัดแต่ละระดับ แต่หากเกิด 2 กลไกพร้อมกันแสดงให้เห็นว่าการเสถียรแบบถาวรขึ้นแล้ว เมื่อทดสอบแรงอัดกับท่อที่ยาวและบางกลไกการโค้งงอแรกที่เกิดขึ้นคือการโก่งตัวแบบยืดหยุ่นทั่วไป (General elastic buckling) หรือ Euler จากนั้นหากเพิ่มแรงอัดมากขึ้นจะทำให้เกิดการเสถียรแบบถาวรเรียกว่าการโก่งตัวเฉพาะที่ (Local buckling) โดยขึ้นกับค่ามอดุลัส และรูปร่างของวัสดุ ส่วนการยุบตัวถาวรขึ้นอยู่กัค่าความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) ของวัสดุซึ่งมีสมการที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนี้ [41]



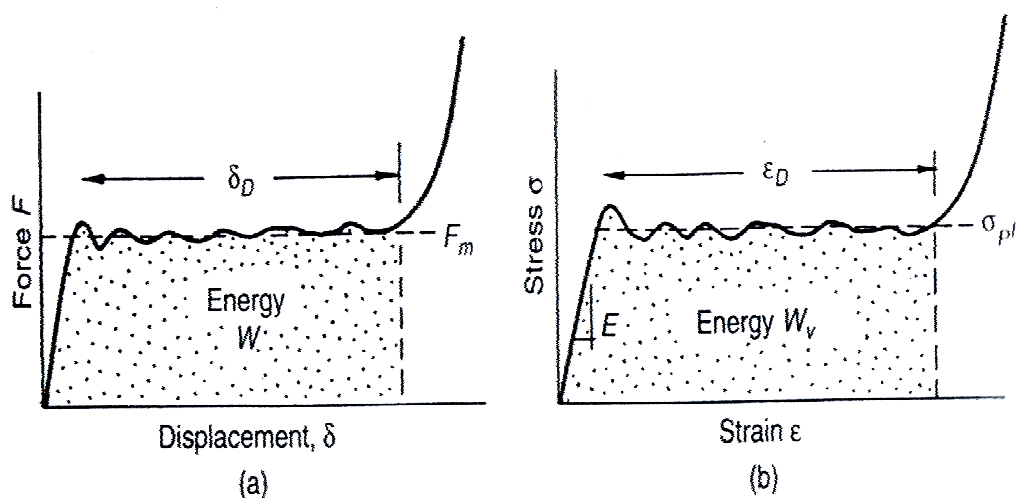
รูปที่ 2.40 การเกิดการเสถียรแบบการโก่งเฉพาะที่ของท่อโลหะ [41]

## 2.10 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมในท่อ

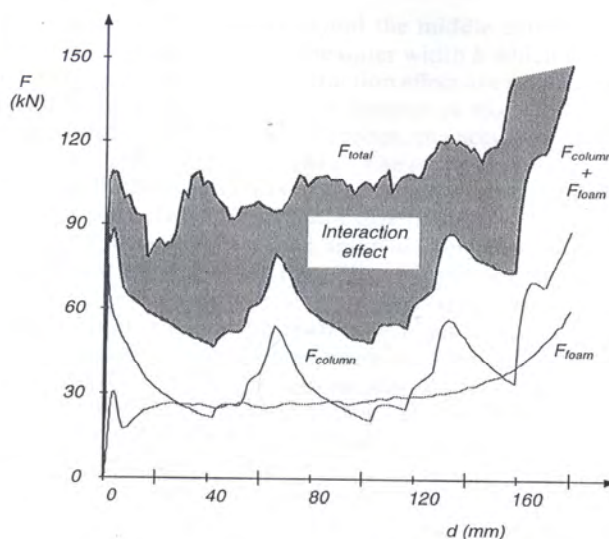
เมื่อโฟมอะลูมิเนียมได้รับแรงอัดผนังโพรงอากาศจะเกิดการโค้งงอที่ความเค้นเกือบจะคงที่จนกระทั่งพื้นผิวของโพรงอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนท่อก็มีพฤติกรรมที่แตกต่างกันไปคือจะเกิดการโค้งงอเป็นรอยพับจนกระทั่งรอยพับนั้นเกิดการสัมผัสกันทั้งหมดดังในรูปที่ 2.41 ซึ่งผลที่ได้จะแสดงออกมาดังรูปที่ 2.42 (a) และ 2.42 (b) โดยในรูปที่ 2.42 (a) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการพังตัว (Displacement) แบ่งเป็นส่วนของเส้นแสดงโหลดแบบยืดหยุ่น (Elastic loading line) ต่อมาในส่วนที่มีแรงคงที่เป็นแนวยาว ( $F_m$ ) ในส่วนสุดท้ายจะมีความชันสูงขึ้นเนื่องจากผนังโพรงอากาศหรือรอยพับเกิดการสัมผัสกัน และจากรูป 2.42 (b) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แบ่งเป็นส่วนของความชันซึ่งก็คือค่าความต้านทานการเสียรูปนั่นเอง ( $E$ ) ต่อมาเป็นส่วนที่มีค่าความเค้นคงที่ (Plateau stress,  $\sigma_{pl}$ ) และที่จุดสุดท้ายที่ความเค้นคงที่ค่าความเครียดที่จุดนั้นเรียกว่า Densification strain ( $\epsilon_D$ ) บริเวณที่แรงานั้นจะเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการรับแรงอัดได้ ซึ่งจากรูปที่ 2.43 แสดงให้เห็นความสามารถในการรับแรงอัดของโฟม ( $F_{foam}$ ) ท่อ ( $F_{tube}$ ) และโฟมในท่อ ( $F_{total}$ ) จะเห็นได้ว่าแรงทั้งหมดที่ได้จากทฤษฎีการบวมของแรงกระทำในท่อและโฟม ( $F_{foam} + F_{tube}$ ) มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากกรณีโฟมในท่อซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ผลของอันตรกิริยาระหว่างกัน (Interaction effect) [4]



รูปที่ 2.41 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมและท่อ [4]



รูปที่ 2.42 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน (a) ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับแรงอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด [4]



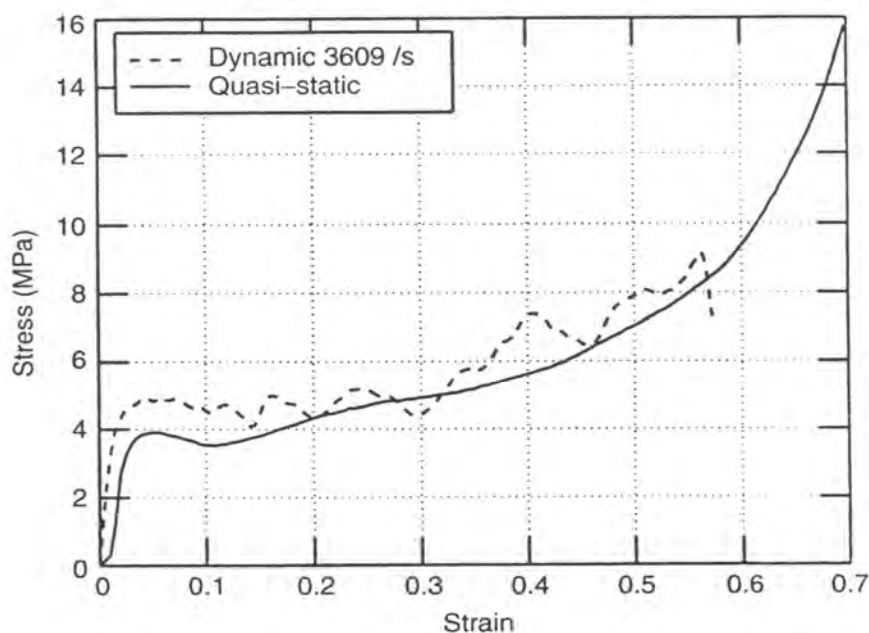
รูปที่ 2.43 แสดงความสามารถในการรับแรงอัดของโฟม ท่อ และโฟมในท่อ [42]

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมในท่อจะแตกต่างจากโฟมอะลูมิเนียมและท่อเปล่า เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมในท่อเมื่อได้รับแรงอัดจะเกิดรอยพับด้านนอกเป็นหลักตัวเนื้อโฟมอะลูมิเนียมที่อยู่ระหว่างรอยพับจึงต้านทานการเปลี่ยนรูปของท่อ [43] ดังนั้นความสามารถในการรับแรงอัดจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

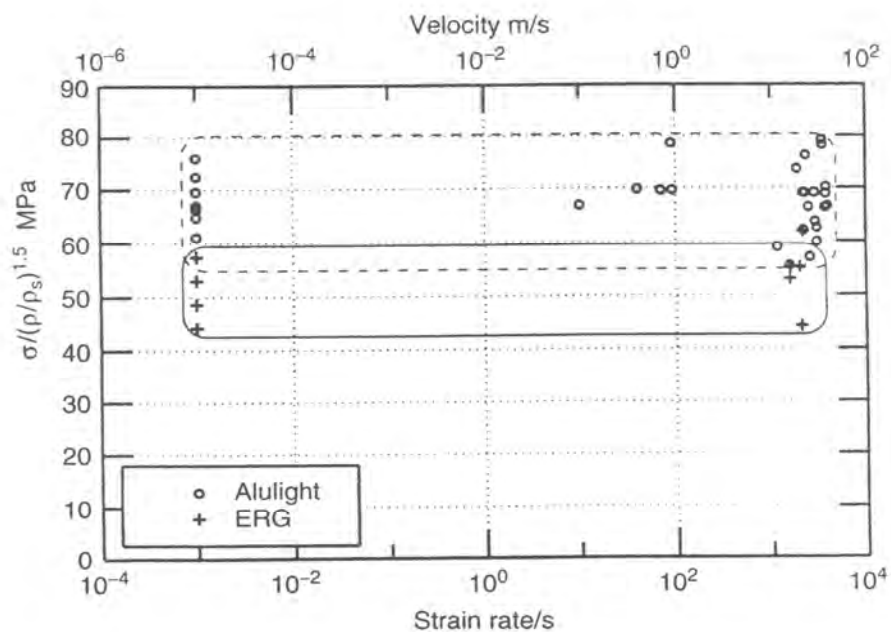
### 2.10.1 อัตราความเครียด (Strain rate)

จากการศึกษากล่าวได้ว่าผลของอัตราความเครียดที่มีต่อวัสดุโฟม ซึ่งสังเกตจากกราฟความเค้น-ความเครียดจะแปรผันตามลักษณะรูปร่าง (Geometry) และกระบวนการผลิต [44] ส่วนที่เกิดจากสมบัติทางกลนั้นมาจาก วัสดุพื้นและของไหลที่อยู่ภายในอากาศ ด้วยเหตุนี้ในวัสดุโฟม โครงสร้างแบบปิดจึงช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดและความเค้นพลาโต (Plateau stress,  $\sigma_{pl}$ ) [45] และ K.A.Danneman, et al. [44] ได้ศึกษาผลของอัตราความเครียดสูงเนื่องจากแรงอัดที่มีต่อ โฟมอะลูมิเนียม โครงสร้างแบบปิดพบว่า โฟมอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะส่งผลให้ความแข็งแรงการอัด (Compressive strength) สูงขึ้นอย่างรวดเร็วที่อัตราความเครียดเท่ากัน ส่วน โฟมอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นต่ำและมีโครงสร้างแบบเปิด อัตราความเครียดจะไม่มีผลต่อความแข็งแรงการอัด โดยความความเร็วของแรงกระทบประมาณ 1 m/s จะทำให้เกิดอัตราความเครียด  $100 \text{ s}^{-1}$  ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของโฟม บริเวณความเค้นพลาโตเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากต่ออัตราความเครียดดังรูปที่ 2.44 และ 2.45 ทั้งนี้ยังได้แนะนำอีกว่าความเค้นพลาโตจะเพิ่มขึ้นขณะที่อัตราความเครียดเพิ่มไม่เกิน 30 % โดยจะใช้อัตราความเครียดในช่วง

$$3.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 3.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

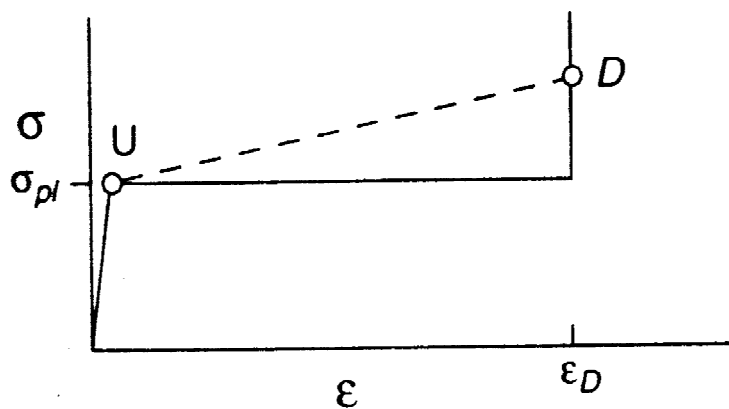


รูปที่ 2.44 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.18 และอัตราความเครียด  $3.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  และ  $3.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  [4]



รูปที่ 2.45 แสดงให้ค่าความเค้นพลาสติกที่อัตราความเครียดที่เพิ่มจนถึง  $3.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  [4]

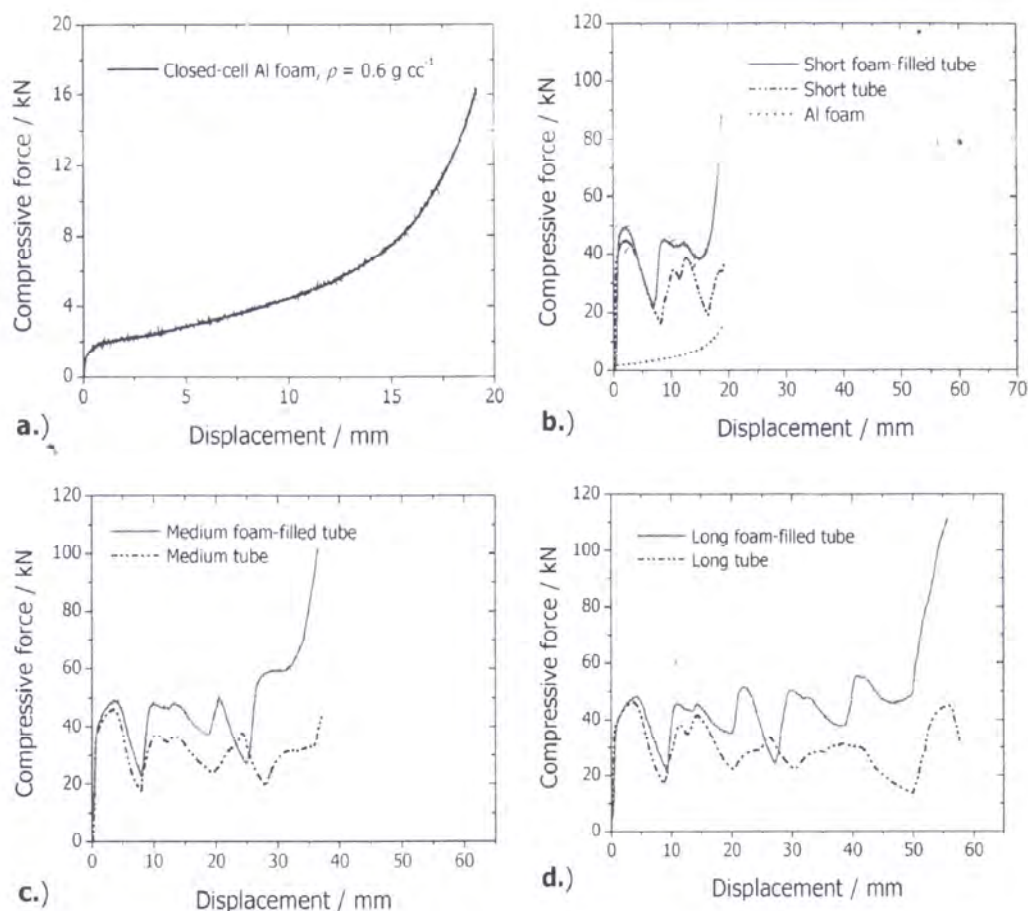
อัตราความเครียดที่ช้าจนเกือบจะคงที่ (Quasi-static) และอัตราความเครียดที่รวดเร็ว (Dynamic) จะส่งผลต่อพฤติกรรมของการรับแรงอัดที่แตกต่างกัน โดยอัตราความเครียดที่ช้าจะไม่ค่อยส่งผลต่อพฤติกรรมของการรับแรงอัดมากนักจึงมีกราฟ ความเค้น-ความเครียด ที่ใกล้เคียงอุดมคติซึ่งในบริเวณความเค้นพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากต่ออัตราการยืด แต่ให้อัตราความเครียดสูงจะทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดความชันขึ้นดังรูปที่ 2.46 จึงทำให้การรับแรงอัดมีประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงต้องพัฒนาในส่วนนี้ต่อไป



รูปที่ 2.46 การเกิดความชันบริเวณความเค้นพลาสติกเนื่องจากอัตราความเครียดสูง [4]

### 2.10.2 ความยาวของท่อ (Tube length)

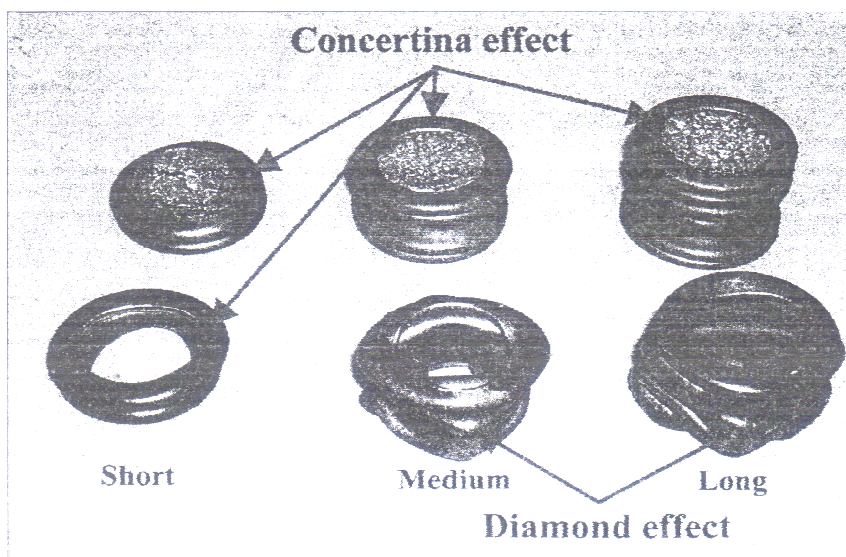
จากงานวิจัยของ Hassen, et al. [42] พบลักษณะการเสียรูป 2 แบบในการทดสอบแรงอัดที่มีต่อท่อเปล่าและโฟมในท่อ คือการพับตัวแบบวงกลม (Concertina effect) และการพับตัวแบบเพชร (Diamond effect) สรุปได้ว่าการพับตัวแบบเพชรจะเปลี่ยนเป็นการพับตัวแบบวงกลม เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของโฟมที่เติมเข้าไปในท่อ ดังนั้นหากเพิ่มความยาวของท่อซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณโฟมให้มากขึ้นตามไปด้วยก็อาจส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมได้ดังที่ S. Asavavisithchai, et al. [46] ได้ศึกษาพบว่าโฟมอะลูมิเนียมในท่อของแต่ละความยาวจะมีการรับแรงอัดที่ดีกว่าท่อเปล่า อีกทั้งโฟมอะลูมิเนียมในท่อที่มีความยาวกว่าจะสามารถรับแรงอัดได้มากกว่าด้วย ส่วนในท่อเปล่าแต่ละความยาวนั้นมีความสามารถในการรับแรงอัดไม่ต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับการโก่งตัว a) Al foam b) short c) medium และ d) long Al foam filled tube เปรียบเทียบกับท่อเปล่าที่มีความยาวเท่ากัน [46]



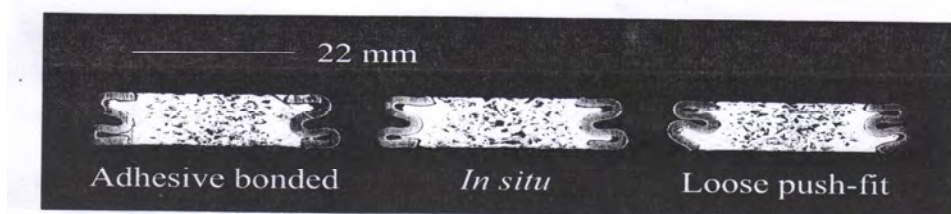
และจากการสังเกตพบว่าการพัคตัวแบบวงกลมในโพลีอะลูมิเนียมในท่อทุกความยาว แต่ในท่อเปล่าจะพบการพัคตัวแบบวงกลมเฉพาะในท่อที่สั้น ( $L/D < 1.06$ ) เท่านั้น ในขณะที่ท่อที่มีความยาวปานกลางและท่อที่มีความยาวมากจะเกิดการเสียดลไถไม่สมมาตรดังรูปที่ 2.48 แสดงให้เห็นว่าที่ความยาวท่อที่มี  $L/D > 1.06$  จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดโดยการเปลี่ยนกลไกการเสียดรูปจากการพัคตัวแบบเพชรให้เป็นการพัคตัวแบบวงกลมซึ่งมีความเสถียรมากกว่า



รูปที่ 2.48 โพลีในท่อและท่อเปล่าที่ความยาวสามระดับแสดง concertina และ diamond bulking mode [46]

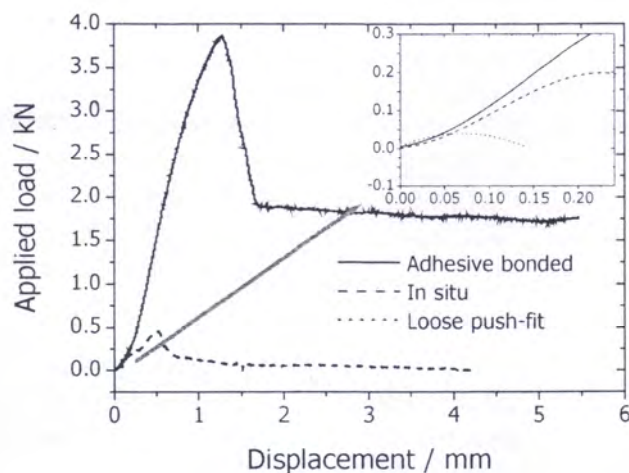
### 2.10.3 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างโพลีอะลูมิเนียมกับท่อ (Bonding strength)

ในการศึกษาของ S. Asavavisithchai, et al. [47] ซึ่งใช้การยึดเกาะ 3 แบบระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกับโพลีอะลูมิเนียม คือ (1) แบบติดกาว (Adhesive) (2) ผลิตเป็นชิ้นงานโพลีแล้วจึงนำไปใส่ในท่อ (Push-fit) และ (3) โพลีในท่อโดยตรง (In situ) โดยจากทดสอบการยึดเกาะทั้ง 3 แบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.49

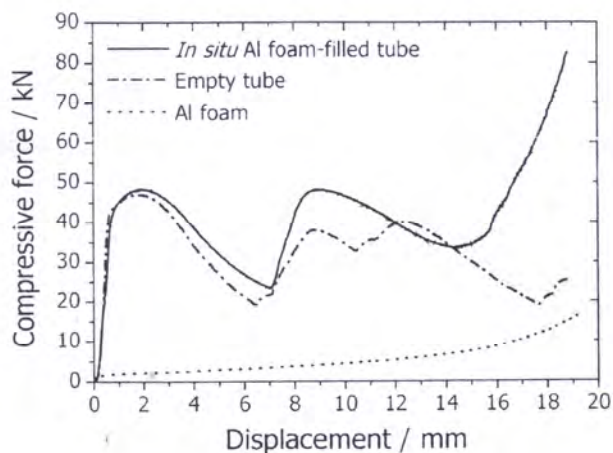


รูปที่ 2.49 แสดงพันธะระหว่างท่อกับโพลีในแบบต่างๆ [47]

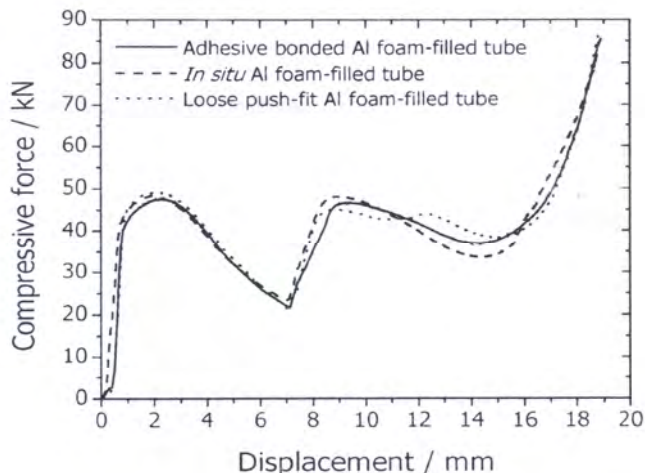
สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นจะอยู่ในช่วงของความยืดหยุ่นสามารถรับแรงอัดได้จนถึงค่าสูงสุด ต่อมาในช่วงที่สองแรงจะตกอย่างรวดเร็วเนื่องจากพันธะระหว่างโฟมอะลูมิเนียมกับท่อเริ่มหลุดออกจากกันและในช่วงสุดท้ายแรงคงที่เพราะโฟมอะลูมิเนียมเกิดการหลุดออกมาทั้งชิ้นงาน ทั้งนี้การยึดเกาะแบบใช้กาวจะมีความแข็งแรงมากที่สุด แต่ในการทดสอบแรงอัดนั้นผลที่ได้กลับไม่เป็นเช่นนั้นดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.50 2.51 และ 2.52 ว่าการยึดเกาะทุกแบบมีผลน้อยมากต่อพฤติกรรมการรับแรงอัด ในการศึกษาลักษณะเดียวกันนี้ของการเปรียบเทียบการยึดเกาะระหว่างแบบโฟมแล้วใส่ท่อกับการเชื่อมโดยใช้เลเซอร์ก็แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างน้อยมากในด้านพฤติกรรมการรับแรงอัด



รูปที่ 2.50 ความแข็งแรงของโฟมอะลูมิเนียมในท่อที่พันธะแตกต่างกัน [47]



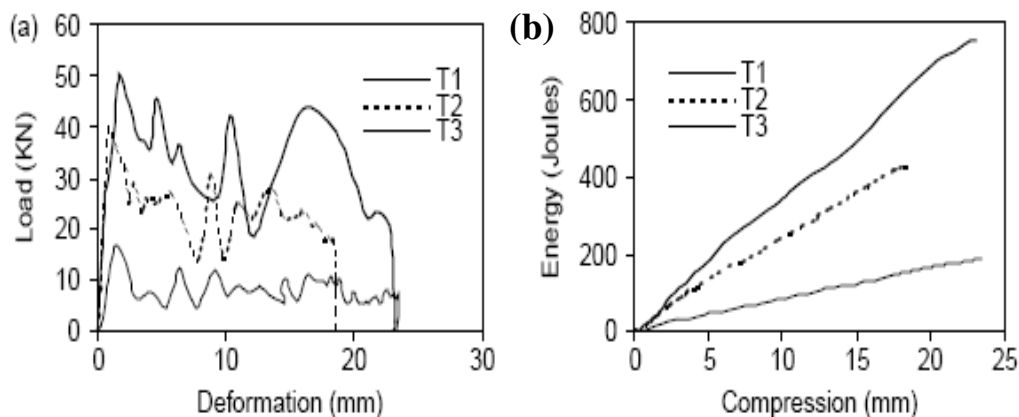
รูปที่ 2.51 การทดสอบแรงอัดบนโฟมอะลูมิเนียมในท่อ ท่อเปล่า และ โฟมอะลูมิเนียม [47]



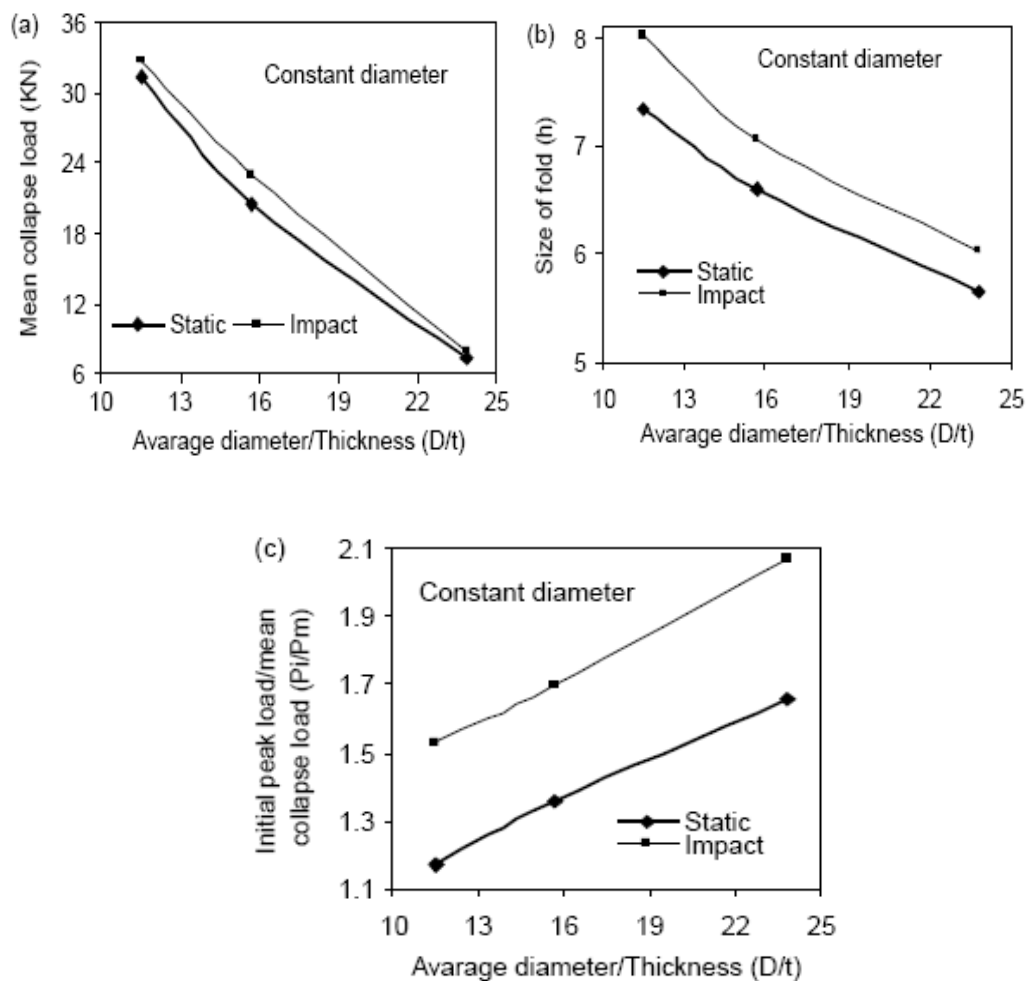
รูปที่ 2.52 ผลของความแข็งแรงของพันธะที่มีต่อการทดสอบแรงอัดในพันธะที่แตกต่างกัน [47]

#### 2.10.4 ความหนาของท่อ (Thickness of tube wall)

เมื่อเพิ่มความหนาของท่อจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดแต่การกระจายแรงก็จะมากตามไปด้วยระหว่างที่เกิดกระบวนการการโค้งงอและน้ำหนักของชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้นด้วย W. Abramowicz, et al. [48] กล่าวว่า ชิ้นงานที่แข็งแรงกว่าหรือมีความหนาของท่อมากกว่าจะมีความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาของท่อน้อยมากจะเกิดพฤติกรรมการโค้งงอแบบไม่สมมาตร (non-axisymmetric) ในช่วงของการยัดหุ่ย ซึ่งจะมีบางส่วนรวมกันเนื่องจากความไม่เสถียรทำให้เกิดพฤติกรรมการโค้งงอแบบโดยรวม โดยแกนของท่อจะเกิดลักษณะรอยหักพับพลาสติกให้สูญเสียความสามารถในการรับแรงอัดไป การแก้ไขสาเหตุดังกล่าวทำได้โดยการเติมวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้ดีลงในท่อ N.K. Gupta, et al. [49] ศึกษาผลของความหนาที่มีต่อการเสียรูปของท่ออะลูมิเนียมพบว่าแรงที่ใช้ในการทำให้ท่อเสียรูปและการดูดซับพลังงานจะมากขึ้นเมื่อความหนาของท่อมากขึ้นดังรูปที่ 2.53 อีกทั้งยังพบว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการทำให้เสียรูปและขนาดของรอยพับจะลดลงด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.54



รูปที่ 2.53 a) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับการเสียรูป b) ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับพลังงานกับการเสียรูป [49]



รูปที่ 2.54 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ทำให้เกิดการเสียรูป ขนาดของรอยพับและแรงที่ทำให้เกิดรอยพับแรกที่มีความหนาต่างกัน [49]

### 2.10.5 รูปร่างหน้าตัดของท่อ (Cross section of tube)

การรับแรงอัดในเชิงกลศาสตร์นั้นนอกจากสมบัติของวัสดุเองรูปร่างของวัสดุก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ในส่วนของรูปร่างหน้าตัดของท่อก็มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดเช่นกัน โดยตั้งบนสมมติฐานที่ว่าพื้นที่หน้าตัดจะต้องเท่ากันในแต่ละรูปร่าง ทั้งนี้เพราะพื้นที่หน้าตัดมากก็จะสามารถกระจายแรงอัดได้มากทำให้มีความสามารถในการรับแรงอัดมากขึ้น Seitberger, et al. [50] กล่าวว่า โฟมอะลูมิเนียมในท่อหน้าตัดหกเหลี่ยมมีความต้านทานการเสีรูปร่างมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ในการเปรียบเทียบระหว่างโฟมอะลูมิเนียมในท่อหน้าตัดรูปหกเหลี่ยมกับโฟมอะลูมิเนียมในท่อหน้าตัดรูปแปดเหลี่ยมไม่พบความแตกต่างมากนัก เนื่องจากส่วนที่สำคัญในการกระจายแรงอัดมาจากการเสีรูปร่างบริเวณมุมของรอยพับเพราะหากที่มุมฉีกขาดเนื่องจากแรงอัดแล้ว การเสีรูปร่างซึ่งเป็นการกระจายแรงอัดจะหยุดจึงทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดน้อยลงด้วย ด้วยเหตุนี้หากหน้าตัดมีมุมมากจะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

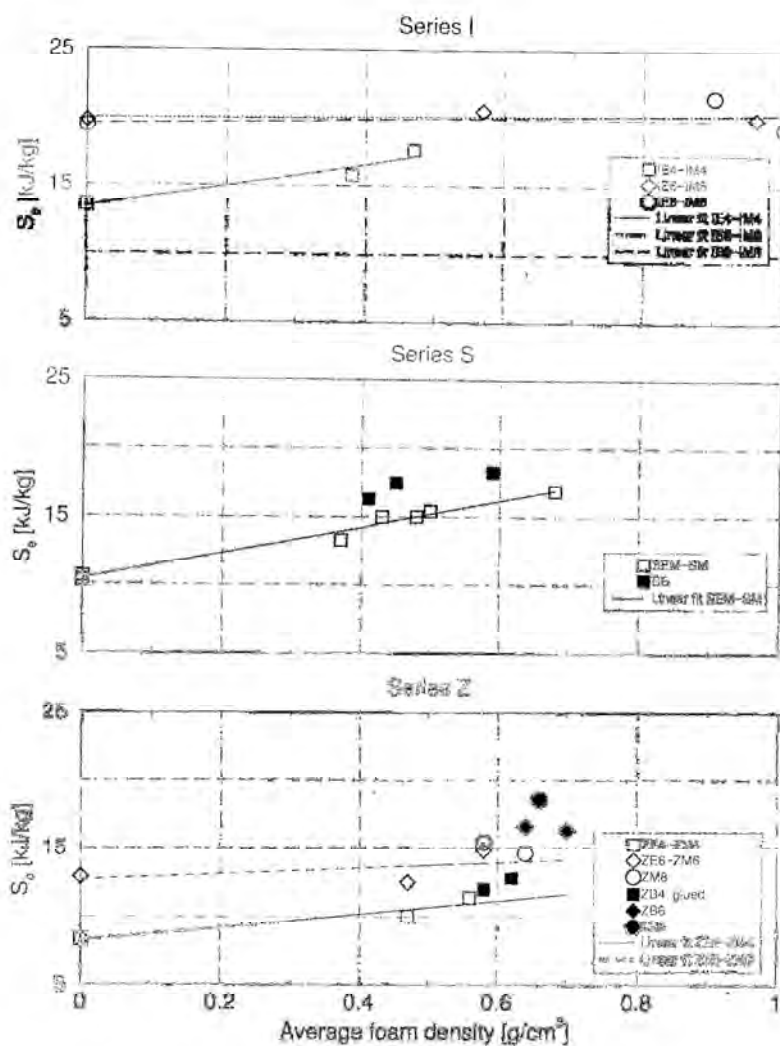


รูปที่ 2.55 แสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดที่มีต่อหน้าตัดท่อที่แตกต่างกัน [50]

### 2.10.6 วัสดุที่ใช้ (Material selection)

เป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัด โดยส่วนใหญ่ในวัสดุที่เป็นโฟมอะลูมิเนียมในท่อเราจะเลือกโฟมที่มีความหนาแน่นไม่สูงจนเกินไปนักและตัวท่อที่ความหนาแน่นไม่ต่ำเกินไป เพราะอาจมีผลต่อสมบัติทางกลดังที่ Seitberger, et al. [50] ได้กล่าวไว้ว่าความหนาแน่นของโฟมมีผลทำให้ค่าความเครียดลดลงและบริเวณ ความเค้นพลาโตจะมีความสูงขึ้นไม่คงที่ซึ่งผลข้างต้นส่งผลเสียต่อความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมดังรูปที่ 2.56 ดังนั้นจึงต้องใช้อการจำกัดความหนาแน่นของโฟมซึ่งขึ้นอยู่กับตัววัสดุพื้นที่ใช้ทำโฟมนั้นเอง โดย Seitberger แนะนำว่าควรใช้โฟมที่มีความหนาแน่นมากที่สุดระหว่าง  $0.5-0.6 \text{ g/cm}^3$  ในกรณีของท่อนั้นเมื่อมีความ

หนาแน่นมากขึ้นจะเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดแต่ราคาก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนโฟมใน  
 ท่อนั้นเมื่อความหนาแน่นมากขึ้นจะทำให้เกิดรอยพับด้านนอกมากขึ้นและมีแนวโน้มในการเสียรูป  
 โดยรวมได้ง่ายขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดผลของปฏิกิริยาระหว่างกัน มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะไม่นับอยู่กับ  
 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างโฟมกับท่อตั้งที่กล่าวข้างต้น



รูปที่ 2.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับการดูดซับพลังงานในท่อที่ใช้วัสดุแตกต่างกัน

[50]

## 2.11 แบบจำลองพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมในท่อ

ปัจจุบันมีการทำนายพฤติกรรมการเสถียรของโฟมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) หรือแม้แต่การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งสามารถทำนายพฤติกรรมของโฟมที่มีโครงสร้างแบบปิดหรือแบบเปิดได้ เนื่องจากโฟมโครงสร้างแบบปิดซึ่งมีโครงสร้างไม่ปกติประกอบด้วยขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศซึ่งทำให้โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ ส่วนมอดูลัสและความแข็งแรงของโครงสร้างโฟมแบบปิดโดยปกติจะต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีของแบบจำลองซึ่งมีพื้นฐานจากโครงสร้างโฟมในอุดมคติ ค่าต่างๆที่ลดลงเนื่องมาจากมีจุดบกพร่องในโครงสร้าง ความหนาแน่นที่ไม่คงที่ ความโค้งของผนังโพรงอากาศ และการย่นของผนังโพรงอากาศทำให้ผนังโพรงอากาศเกิดการโก่งตัวเข้ามากกว่าที่จะเกิดการโก่งตัวออก แบบจำลองของโฟมโครงสร้างแบบเปิดจึงสามารถทำนายพฤติกรรมทางกลของโฟมได้ดีกว่าแบบปิด [3] โดยจากการศึกษาของ M.F. Ashby, et al. [4] ได้สร้างแบบจำลองการดูดซับพลังงานของโฟมโลหะในอุดมคติโดยไม่ได้นำค่าความแข็งแรงเนื่องจากความเครียดมาช่วยในการพิจารณาได้สมการ

$$W^{Foam} = C_1 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \sigma_{ys} \varepsilon_D^{Foam} \quad (2.5)$$

และยังสร้างแบบจำลองในส่วนการดูดซับพลังงานของท่ออีกด้วยดังสมการ

$$W^{Tube} = 2^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\frac{5}{3}} \sigma_{ys} \varepsilon^{Tube} \quad (2.6)$$

โดยค่าคงที่  $C_1$  มีค่าประมาณ 0.3 ส่วน  $\rho$  และ  $\rho_s$  เป็นความหนาแน่นของโฟมโลหะและวัสดุเนื้อพื้น ตามลำดับ ค่า  $\sigma_{ys}$  คือ ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุเนื้อพื้น นอกจากนี้ยังได้สร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความแข็งแรงอัดของโฟมโลหะได้สมการ

$$\sigma_f = (0.1 - 1.0) \sigma_s \times \left[ 0.5 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\frac{2}{3}} + 0.3 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right) \right] \quad (2.7)$$

โดย  $\sigma_f$  และ  $\sigma_s$  แทนความแข็งแรงอัดของโฟมโลหะและวัสดุเนื้อพื้น ตามลำดับ ซึ่งจากหัวข้อที่กล่าวไปข้างต้นเมื่อนำโฟมโลหะไปใส่ในท่อแล้วนำไปปรับแรงอัด ค่าที่ได้จากทฤษฎีโดยการบวกของแรงกระทำในท่อและโฟมมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากกรณีโฟมในท่อซึ่งเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างกัน ดังนั้นสมการรวมเพื่อหาค่าการดูดซับพลังงานที่ถูกจึงต้องรวมการดูดซับพลังงานในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างกันด้วยดังนี้

$$W^{Filled-tube} = W^{Foam} + W^{Tube} + W^{Int} \quad (2.8)$$

โดย  $W^{Int}$  คือ ค่าการดูดซับพลังงานในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างโฟมโลหะและท่อ เนื่องจากโฟมโลหะจะช่วยให้รอยหยักของท่อเวลาได้รับแรงอัดสั้นและมีจำนวนมากขึ้น



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 ผงอะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.7 % จาก Ecka Granule ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.2 ผงไทเทเนียมไฮไดรด์ ( $TiH_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99 % จาก Sigma Aldrich
- 3.1.3 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 หน้าตัดวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 25 mm มีความหนา 1 mm และมีความยาว 30 mm
- 3.1.4 ผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ )
- 3.1.5 ผงซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ )
- 3.1.6 ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC)
- 3.1.7 ผงไททานเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ความบริสุทธิ์ 98 % จาก Sigma Aldrich

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องผสมผงโลหะ
- 3.2.2 แบบสำหรับขึ้นรูป Precursor ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 22 mm
- 3.2.3 แม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 25 mm
- 3.2.4 เตาสำหรับอบชิ้นงาน Protherm รุ่น PLF 140/9B
- 3.2.5 เครื่องอัดขึ้นรูป Precursor
- 3.2.6 เครื่องทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียม SHIMADZU รุ่น AG-10TE
- 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) JOEL รุ่น JSM 6400 Tokyo
- 3.2.8 เครื่องตัดชิ้นงาน STRUERS รุ่น Discotom-2
- 3.2.9 เครื่องตัดชิ้นงานความเร็วต่ำ BUEHLER รุ่น ISOMET 2000
- 3.2.10 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การผลิต Precursor (Production of precursor)

ผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับผง  $TiH_2$  0.6wt.% และ 0, 1, 3 และ 5 wt.% ของผงอะลูมินา ผงซิลิกอนไดออกไซด์ ผงไททาเนียมไดออกไซด์ และผงซิลิกอนคาร์ไบด์ในแต่ละชิ้นงาน โดยใช้เครื่องผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำผงที่ผสมเรียบร้อยแล้วจำนวน 10 กรัม ไปอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (Die) ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ ซึ่งก่อนการใช้งานต้องใช้ฟูกันจุ่มสารหล่อลื่น (Lithium stearate) หรือ วาสลีน (Vaseline) ทาบริเวณพื้นผิวภายในแม่พิมพ์เพื่อให้สามารถนำ Punch ออกจากตัวแม่พิมพ์ได้ง่ายและลดความเสียหายเนื่องจากการเสียดสีกันระหว่าง Punch กับตัวแม่พิมพ์ด้วย โดยใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูป 650 MPa เพื่อให้ได้ Precursor ที่มีความหนาแน่นทางทฤษฎีสูงกว่า 99 % ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่ทำให้เกิดโครงสร้างโฟมที่ดี

#### 3.3.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม (Production of Al Foam)

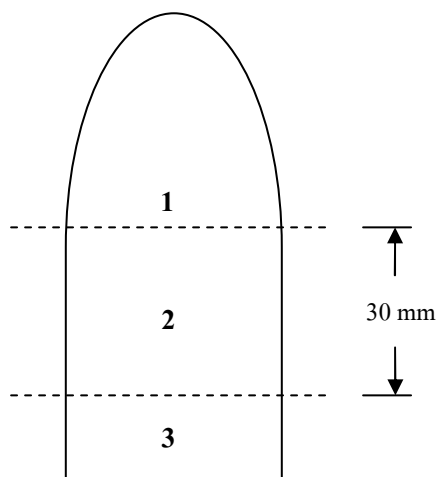
นำ Precursor ที่ได้ใส่ลงในแม่พิมพ์ที่มีหน้าตัดวงกลมที่ใช้โบรอน ไนไตรด์ (Boron nitride) ทาบริเวณพื้นผิวภายในแม่พิมพ์แล้วนำไปให้ความร้อนในเตาที่มีการ Pre-heat ไปที่อุณหภูมิ 800 °C โดยทำการประมาณเวลาที่ Precursor จะมีการขยายตัวสูงสุดจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากเตาแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ แล้วนำไปตรวจวัดความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมที่ได้

#### 3.3.3 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม

การวัดความหนาแน่นของ Precursor ทำได้โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดขนาดของ precursor เพื่อคำนวณหาปริมาตรของ Precursor จากนั้นนำ Precursor ไปชั่งเพื่อหาน้ำหนัก นำน้ำหนักและปริมาตรของ Precursor มาคำนวณหาความหนาแน่น การวัดความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียม ทำได้โดยใช้วิธี Archimedes' densitometry (ดูวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก)

### 3.3.4 การทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีน

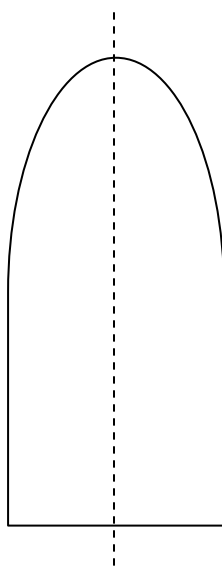
นำโพลีเอทิลีนที่ได้จากการทดลองไปตัดด้วยเครื่อง Discotom ในทิศตั้งฉากกับชิ้นงาน ให้มีความสูง 30 มิลลิเมตรในส่วนที่ 2 ดังรูปที่ 3.1 แล้วนำไปใส่ในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีขนาดเท่ากับโพลีเอทิลีนที่ตัดมาโดยไม่ต้องทาสารยึดเกาะ (Adhesive) ซึ่งวิธีการใส่แบบนี้เรียกว่า Push-fit จากนั้นจะแบ่งกลุ่มของโพลีเอทิลีนที่ใช้ในการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 โพลีเอทิลีนที่ไม่ได้เติมอนุภาคเซรามิก (Ceramic particle) กลุ่มที่ 2 โพลีเอทิลีนที่มีการเติมอนุภาคเซรามิกเพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min โดยใช้หัวกดที่มีแรงสูงสุด  $10^4$  Kgf และวัดค่าความแข็งแรงอัดที่ 70% ความเครียด



รูปที่ 3.1 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโพลีเอทิลีนเพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัด

### 3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียม

ผลิตชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมโดยการเติมอนุภาคเซรามิกชนิดละ 3 wt.% โดยผลิตที่เวลาตั้งแต่ 285 วินาที แล้วเพิ่มครั้งละ 15 วินาที จนกระทั่งถึงเวลา 360 วินาที จะได้ชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกชนิดละ 6 ชิ้น จากนั้นนำไปหาเปอร์เซ็นต์การขยายตัว (ดูวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก) แล้วนำไปตัดด้วยเครื่อง Discotom ตามทิศทางในรูปที่ 3.2 ต่อมาจึงนำชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่ตัดแล้วไปพ่นด้วยสีดำทึบแล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 เพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างโพรงอากาศและโครงสร้างโพรงอากาศชัดเจนยิ่งขึ้น



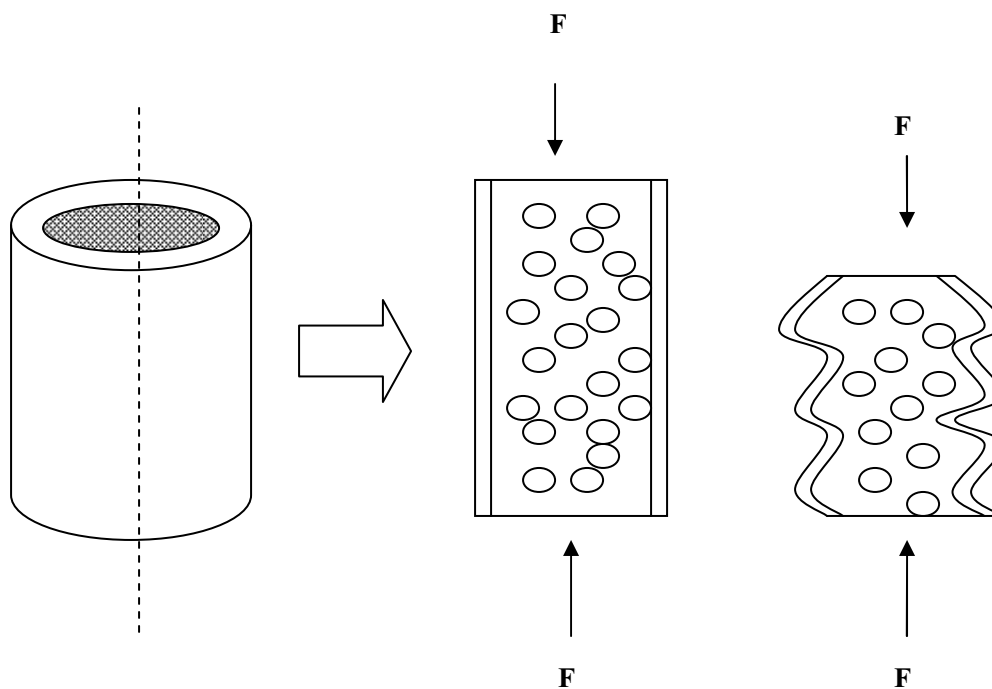
รูปที่ 3.2 ทิศทางที่ใช้ในการตัดชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

### 3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโพลิเอทิลีน

นำชิ้นงานในบริเวณที่ 1 และ 3 จากรูปที่ 3.1 ไปทำ Cold mounting เพื่อเตรียมสำหรับขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้าง จากนั้นนำโพลิเอทิลีนที่ทำกร Mount แล้วไปขัดหยาบด้วยกระดาษทราย และขัดละเอียดด้วยผงเพชรจนถึงขนาด  $1\ \mu\text{m}$  แล้วจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดแล้วไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และ SEM

### 3.3.7 การตรวจสอบโครงสร้างของโพลิเอทิลีนในท่อระหว่างการอัดที่ระยะการอัดต่างๆกัน

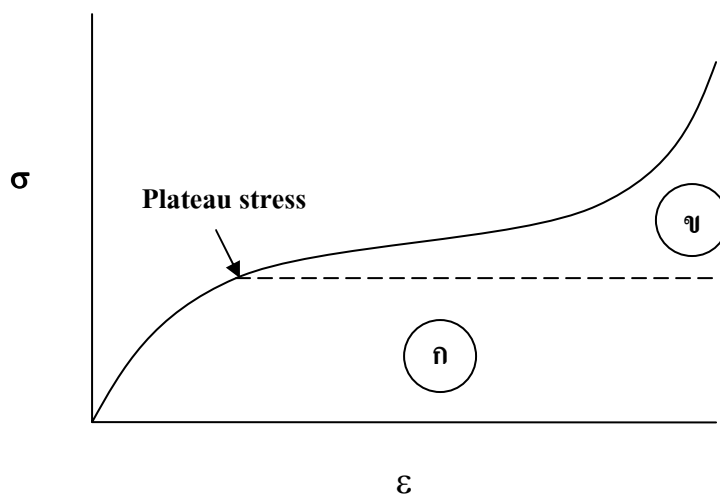
แบ่งโพลิเอทิลีนในท่อเป็น 2 กลุ่ม คือ ก่อนและหลังการรับแรงอัดในแต่ละอัตราส่วนอนุภาคเซรามิกและทำที่ 20% 40% 60% และ 70% ความเครียดจากนั้นนำไปตัดครั้งดังรูปที่ 3.3 เพื่อตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และ SEM



รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการตรวจสอบโครงสร้างของโพลิเอทิลีนในท่อระหว่างการอัด

### 3.3.8 การสร้างแบบจำลองจากข้อมูลการทดลอง

นำข้อมูลจากการทดลองจริงมาพัฒนาแบบจำลองจากสมการพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ โดยการหาสมการแนวโน้มจากความสัมพันธ์ต่างๆมาประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อหาการดูดซับพลังงานซึ่งแบ่งพิจารณาออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนโฟมอะลูมิเนียม ความแข็งเนื่องจากความเครียดของ โฟมอะลูมิเนียม ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และอันตรกิริยาระหว่างโฟมอะลูมิเนียมกับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม จากนั้นนำค่าที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงเพื่อดูค่าความคลาดเคลื่อน โดยการหาแบบจำลองของการดูดซับพลังงานยังไม่มีความแน่นอนและตายตัวเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างแบบจำลองการดูดซับพลังงานเบื้องต้นซึ่งนำผลจากการทดลองมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้พยากรณ์ค่าการดูดซับพลังงานโดยประมาณ



รูปที่ 3.4 พื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณการดูดซับพลังงาน

การหาค่าการดูดซับพลังงานโดยทั่วไปสามารถคำนวณหาได้จากสมการ 3.1 [4]

$$C_1 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \sigma_s \varepsilon = (E.A.)_{foam} \quad (3.1)$$

โดยในกรณีนี้ค่าคงที่  $C_1$  จะมีค่าประมาณ 0.3 เนื่องจากส่วน  $\rho_f$  และ  $\rho_s$  เป็นความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมและวัสดุเนื้อพื้น ตามลำดับ ค่า  $\sigma_s$  คือ ค่าความเค้นจุดครากของวัสดุเนื้อพื้น ซึ่งหากมีการเติมอนุภาคเซรามิกลงไป โฟม ค่า  $\rho_s$  และ  $\sigma_s$  จะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคเซรามิกที่เติมลงไปเนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น (สามารถดูวิธีการคำนวณได้จากภาคผนวก ค)

ซึ่งค่า  $\sigma_s$  เป็นค่าที่หามาจากข้อมูลการทดลองจริงจากนั้นนำมาสร้างสมการหาแนวโน้ม ความสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคที่เติมลงไปจึงสามารถแทนค่าด้วยสมการ 3.2 ได้

$$\sigma_s = Ax + B \quad (3.2)$$

โดย A และ B เป็นค่าคงที่ที่ได้จากสมการแนวโน้มในแต่ละกรณี ส่วน x คือปริมาณอนุภาคเซรามิก ที่เติมลงไป เมื่อนำสมการที่ 3.2 แทนในสมการที่ 3.1 จะได้

$$C_1 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (Ax + B) \varepsilon = (E.A.)_{foam} \quad (3.3)$$

ทั้งนี้สมการ 3.1 เป็นสมการในอุดมคติโดยใช้คำนวณพื้นที่ใต้กราฟ ก ตั้งแต่เส้นประ (ความเค้นพลา โท) ลงมา ซึ่งยังไม่รวมค่า Strain hardening ในส่วนของพื้นที่ใต้กราฟ ข ตั้งแต่เส้นประขึ้นไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มในส่วนของสมการที่ 3.4 ซึ่งเป็นสมการกำลัง (Power equation) ดังนี้

$$\int C \varepsilon^n d\varepsilon = (E.A.)_{sh} \quad (3.4)$$

โดย C และ n เป็นค่าที่ได้จากสมการกำลังซึ่งได้มาจากการทดลองจริงและทำการปรับหน่วยเพื่อให้ แทนค่าได้ง่ายขึ้น (ดูวิธีการคำนวณได้จากภาคผนวก ค) เพื่อความแม่นยำและใกล้เคียงค่าจริงมาก ขึ้น จากนั้นเมื่อรวมสมการที่ 3.3 และ 3.4 เข้าด้วยกันจะได้สมการรวมของโฟมดังสมการที่ 3.5

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (Ax + B) \varepsilon + C \frac{(100\varepsilon)^{n+1}}{100(n+1)} = (E.A.)_{foam} \quad (3.5)$$

ในกรณีที่น่ามาใส่ท่อต้องเพิ่มสมการในส่วนของ การดูดซับพลังงานของท่อลงไปด้วยดังสมการที่ 3.6

$$0.183 \sigma_s \varepsilon = (E.A.)_{tube} \quad (3.6)$$

โดยค่าคงที่ 0.183 หาได้จากการทดลองจริง (ดูวิธีคำนวณได้จากภาคผนวก ค) แต่เมื่อรวมกับค่าการ ดูดซับพลังงานของโฟมโลหะแล้วค่าที่ได้ยังน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองจริง ที่เป็นเช่นนี้

เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างท่อและโฟมโลหะ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มสมการในส่วนนี้ซึ่งก็คือสมการที่ 3.7 ได้

$$Dx + E = (E.A.)_{\text{int}} \quad (3.7)$$

ซึ่งค่า D และ E หาจากการทดลองจริงแล้วนำมาหาสมการแนวโน้มเพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอนุภาคเซรามิกที่เปลี่ยนไป เพราะฉะนั้นเมื่อเรานำสมการที่ 3.5, 3.6 และ 3.7 มารวมกันจะได้สมการในการหาค่าการดูดซับพลังงานรวมทั้งหมด ดังนี้

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (Ax + B)\varepsilon + C \frac{(100\varepsilon)^{n+1}}{100(n+1)} + 0.183\sigma_s \varepsilon + Dx + E = (E.A.)_{\text{total}} \quad (3.8)$$

เมื่อเติมอนุภาคเซรามิกแต่ละชนิดลงไปจะทำให้ค่าคงที่ที่แตกต่างกันจึงได้สมการที่แตกต่างกันออกไป ด้วยซึ่งแยกตามชนิดและความเร็วหัวกด โดยที่จะแทน  $\sigma_s$  ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (215 MPa) ลงในสมการเลขเนื่องจากเป็นค่าคงที่ที่ใช้ในทุกกรณีที่ใช้ท่อ ได้สมการต่างๆดังนี้

1. ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

- เมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาจะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (3.16x + 39.23)\varepsilon + 0.82 \frac{(100\varepsilon)^{1.73}}{173} + 39.345\varepsilon + 1.1x - 0.15 = (E.A.)_{\text{total}} \quad (3.9)$$

- เมื่อเติมอนุภาคซิลิกาจะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (10.25x + 45.48)\varepsilon + 0.9 \frac{(100\varepsilon)^{1.71}}{171} + 39.345\varepsilon + 0.85x + 1.88 = (E.A.)_{\text{total}} \quad (3.10)$$

- เมื่อเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (9.12x + 56.03)\varepsilon + 0.87 \frac{(100\varepsilon)^{1.74}}{174} + 39.345\varepsilon + 0.52x - 0.62 = (E.A.)_{\text{total}} \quad (3.11)$$



- เมื่อเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์จะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (8.78x + 40.63)\varepsilon + 1.1 \frac{(100\varepsilon)^{1.68}}{168} + 39.345\varepsilon + 1.4x + 0.36 = (E.A.)_{total} \quad (3.12)$$

2. ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

- เมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาจะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (2x + 47.12)\varepsilon + 0.76 \frac{(100\varepsilon)^{1.76}}{176} + 39.345\varepsilon + 1.19x + 1.48 = (E.A.)_{total} \quad (3.13)$$

- เมื่อเติมอนุภาคซิลิกาจะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (8.41x + 59.49)\varepsilon + 1.41 \frac{(100\varepsilon)^{1.65}}{165} + 39.345\varepsilon + 1.55x - 1.49 = (E.A.)_{total} \quad (3.14)$$

- เมื่อเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (5.74x + 63.63)\varepsilon + 1.57 \frac{(100\varepsilon)^{1.62}}{162} + 39.345\varepsilon + 1.18x - 1.95 = (E.A.)_{total} \quad (3.15)$$

- เมื่อเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์จะได้สมการ

$$0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} (7.36x + 60.19)\varepsilon + 0.97 \frac{(100\varepsilon)^{1.76}}{176} + 39.345\varepsilon + 0.39x - 0.85 = (E.A.)_{total} \quad (3.16)$$

หมายเหตุ: ในที่นี้หากแทนค่าปริมาณอนุภาคเซรามิกไม่เกิน 5% จะได้ค่าที่แม่นยำกว่า เนื่องจากงานวิจัยนี้มีขอบเขตการเติมอนุภาคเซรามิกสูงที่สุดเพียง 5% โดยน้ำหนัก

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าที่หาได้จริงจากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง

#### 3.4.1 ขนาดและรูปร่างโพรงอากาศ

นำชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ทำการพ่นสีและขัดด้วยกระดาษทรายแล้วไปสแกนเพื่อนำไปหาขนาดและรูปร่างโพรงอากาศ ด้วยโปรแกรม Motic Images Plus 2.0 (คู่มือการวัดได้จากภาคผนวก ข) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยกับเวลา และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของโพรงอากาศกับเวลา เพื่อวิเคราะห์ต่อไป

#### 3.4.2 สมบัติทางกล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดมาสร้างกราฟความเค้น-ความเครียด จากนั้นคำนวณหาความเค้นจุดคราก (คู่มือการหาได้จากภาคผนวก ค) รวมทั้งคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟโดยใช้โปรแกรม Origin 6.0 Professional เพื่อหาการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ความเครียด

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 คุณลักษณะของวัสดุ

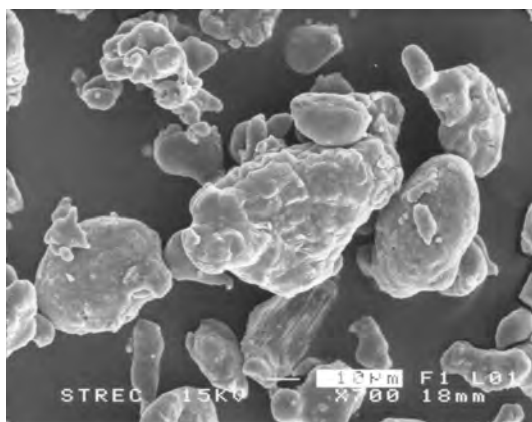
##### 4.1.1 ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคต่างๆ

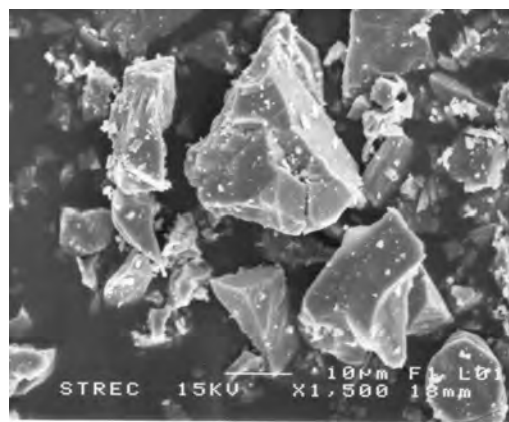
ชนิดอนุภาค	D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)	Mean Diameter (μm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Al powder	45.62	101.55	184.10	108.44	2.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	3.98	60.56	18.87	3.96
SiC	2.68	6.23	11.89	7.11	2.65
SiO <sub>2</sub>	0.06	0.1	19.78	5.38	3.1
TiC	0.05	0.07	4.29	1.16	4.94
TiH <sub>2</sub>	ขนาดเล็กกว่า 46 μm				3.76

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยรวมทั้งความหนาแน่นของอนุภาค โดยผงอะลูมิเนียมซึ่งใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้นนอกจากจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่แล้วยังมีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำและไทเทเนียมไฮไดรด์ซึ่งเป็น foaming agent ก็มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคเซรามิกทุกชนิด สำหรับกรณีของอนุภาคเซรามิกเห็นได้ชัดว่าอนุภาคเซรามิกที่มีออกไซด์เป็นสารประกอบมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคมากกว่าอนุภาคเซรามิกที่มีคาร์ไบด์เป็นสารประกอบหรืออาจกล่าวได้ว่าอนุภาคเซรามิกที่มีคาร์ไบด์เป็นสารประกอบมีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอมากกว่านั่นเอง ส่วนขนาดอนุภาคเฉลี่ยพบว่าอะลูมิเนียมมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดและไทเทเนียมคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดแต่มีความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีความหนาแน่นน้อยที่สุด

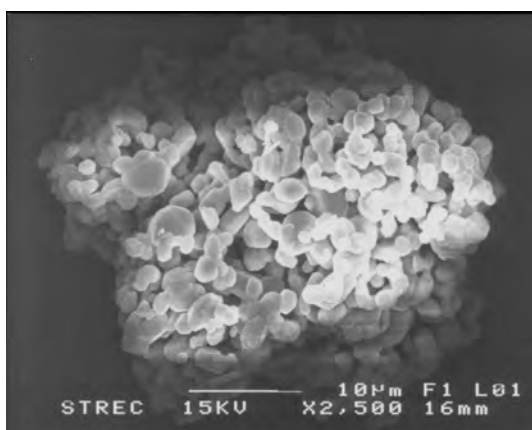
#### 4.1.2 รูปร่างและลักษณะของอนุภาค



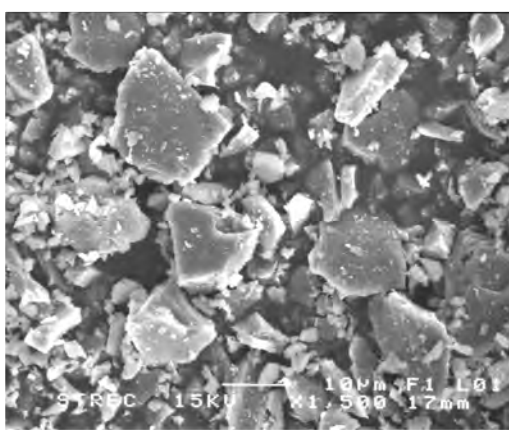
(ก) Al powder



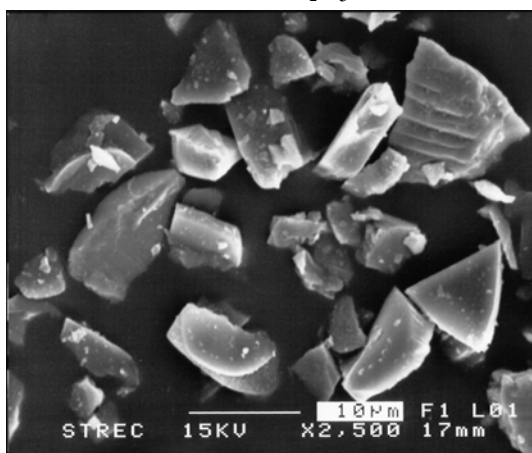
(ข) TiH<sub>2</sub>



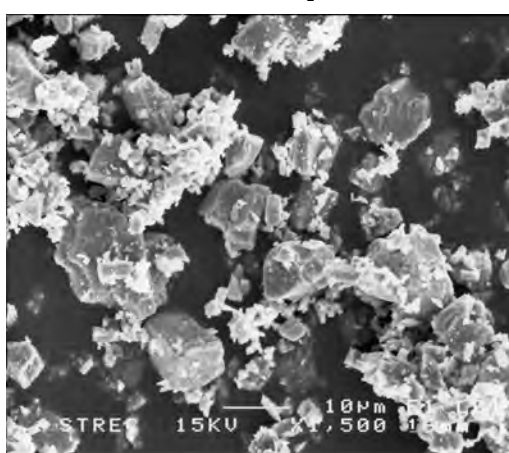
(ค) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



(ง) SiO<sub>2</sub>



(จ) SiC



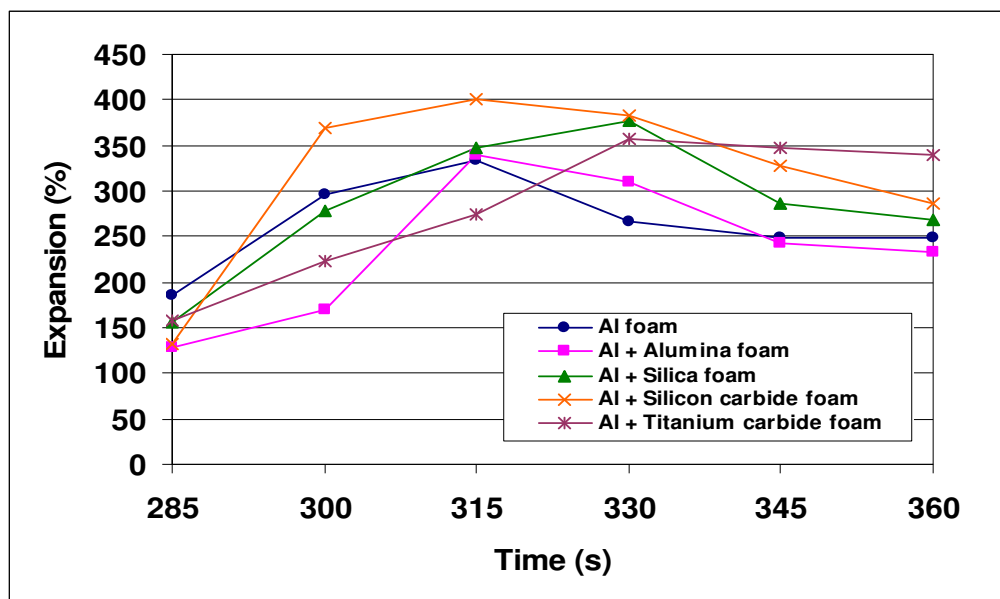
(ฉ) TiC

รูปที่ 4.1 รูปร่างและลักษณะของอนุภาคต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 พบว่า มีเพียงผงอะลูมิเนียมและอะลูมินาเท่านั้นที่มีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงกลมค่อนข้างรี นอกจากนี้อะลูมินามีการจับตัวกันเป็นกลุ่มอย่างเห็นได้ชัดเจนเหมือนกับกลุ่มอนุภาคกลุ่มหนึ่งซึ่งจากตารางที่ 4.1 อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยประมาณ  $19 \mu\text{m}$  ด้วยเหตุนี้ขนาดอนุภาคที่ตรวจสอบได้จึงเป็นขนาดของกลุ่มอนุภาคซึ่งขนาดจริงมีขนาดประมาณ 2 ถึง  $3 \mu\text{m}$  ดังนั้นหากเทียบขนาดของแต่ละอนุภาคอย่างแท้จริงแล้วพบว่าอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆมีขนาดไม่ต่างกันมากนัก โดยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ที่สุดและอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีขนาดเล็กที่สุด สำหรับในอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นรวมทั้งไทเทเนียมไฮไดรด์ล้วนแต่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุมทั้งสิ้น

สำหรับลักษณะพื้นผิวของอนุภาคจะสังเกตเห็นว่าผิวของผงอะลูมิเนียมมีลักษณะโค้งมนเป็นชั้นๆคล้ายชั้นบันได ส่วนไทเทเนียมไฮไดรด์ผิวไม่สม่ำเสมอเป็นเหลี่ยมเป็นมุมคล้ายหินที่ถูกทำให้แตก ในกรณีของอนุภาคเซรามิกซึ่งมีพื้นผิวอนุภาคค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอพบว่า ผิวของอนุภาคอะลูมินามีความเรียบมากที่สุดแต่เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคขึ้นทำให้พื้นผิวของกลุ่มอนุภาคมีลักษณะขรุขระไม่สม่ำเสมอ ส่วนอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีผิวค่อนข้างเรียบมีรอยทำให้เกิดความหยาบบนผิวอนุภาคบ้างเล็กน้อยต่างจากอนุภาคซิลิกาและอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมีเศษอนุภาคเล็กๆเกาะบริเวณผิวของอนุภาค โดยเฉพาะอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่บางอนุภาคมีเศษอนุภาคเล็กๆเกาะกันเป็นกลุ่มบนผิวของอนุภาค

#### 4.2 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

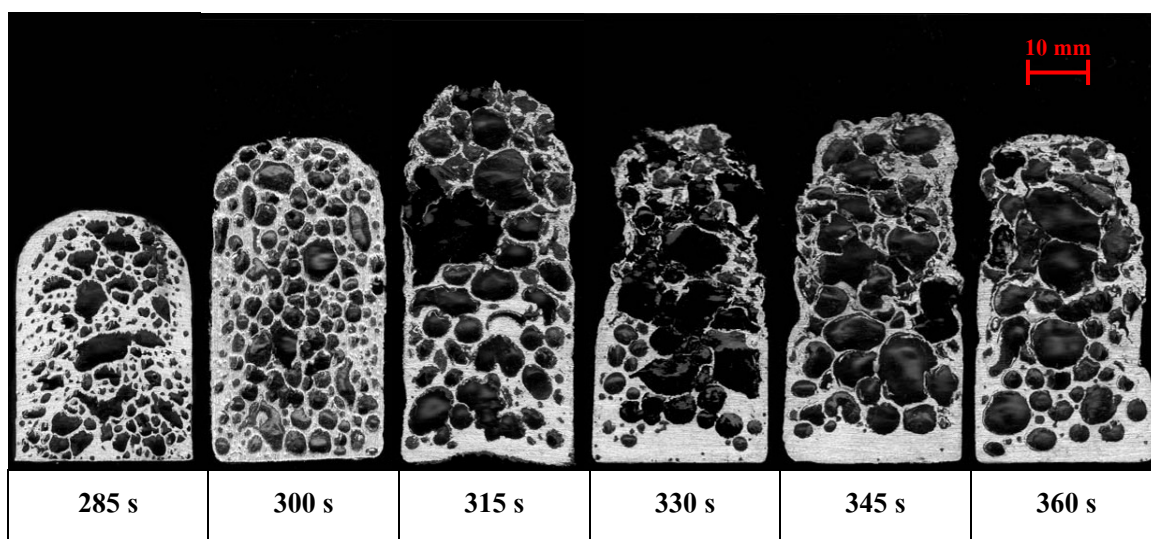


รูปที่ 4.2 การขยายตัวของโฟมที่เสริมอนุภาคเซรามิกที่เวลาต่างๆกัน

จากรูปที่ 4.2 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกเทียบโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งทำการวัดทุกๆ 15 วินาทีตั้งแต่ที่เวลา 285 วินาทีจนกระทั่ง 360 วินาที พบว่าในทุกกรณีมีการขยายตัวสูงสุดในช่วงเวลาระหว่าง 315 ถึง 330 วินาที หลังจากนั้นการขยายตัวจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดการยุบตัวของโฟม โดยเฉพาะโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์นอกจากจะมีการขยายตัวต่ำที่สุดแล้วยังเกิดการยุบตัวของโฟมอย่างรวดเร็วอีกด้วย เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมที่เสริมอนุภาคเซรามิกทุกตัวสังเกตเห็นว่าการขยายตัวสูงสุดสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์อย่างชัดเจน ยกเว้นในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่มีการขยายตัวสูงสุดใกล้เคียงกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างมาก โดยโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีการขยายตัวสูงที่สุดประมาณ 400% นอกจากนี้ในช่วงของการยุบตัวค่าการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีอัตราการลดลงต่ำที่สุดซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้าง

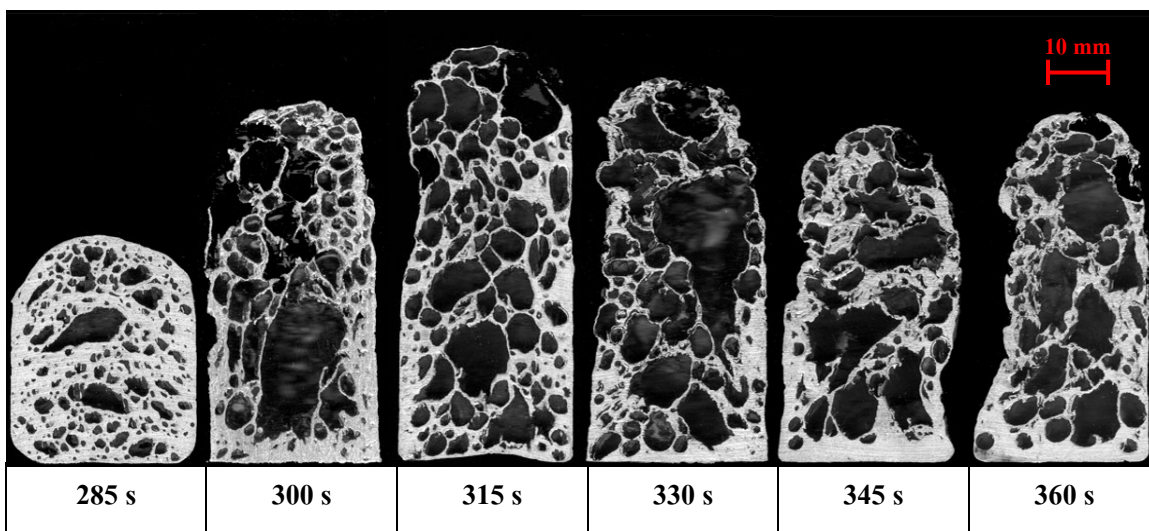
#### 4.3.1 การขยายตัว



รูปที่ 4.3 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 4.3 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมซึ่งมีการขยายตัวสูงที่สุดที่เวลา 315 วินาที จากนั้นจะเกิดการยุบตัวของโฟมอย่างรวดเร็ว แม้จะมีรูปร่างของโพรงอากาศค่อนข้างกลมแต่ขนาดโพรงอากาศที่ได้ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการรวมตัวของโพรงอากาศทำให้โพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น

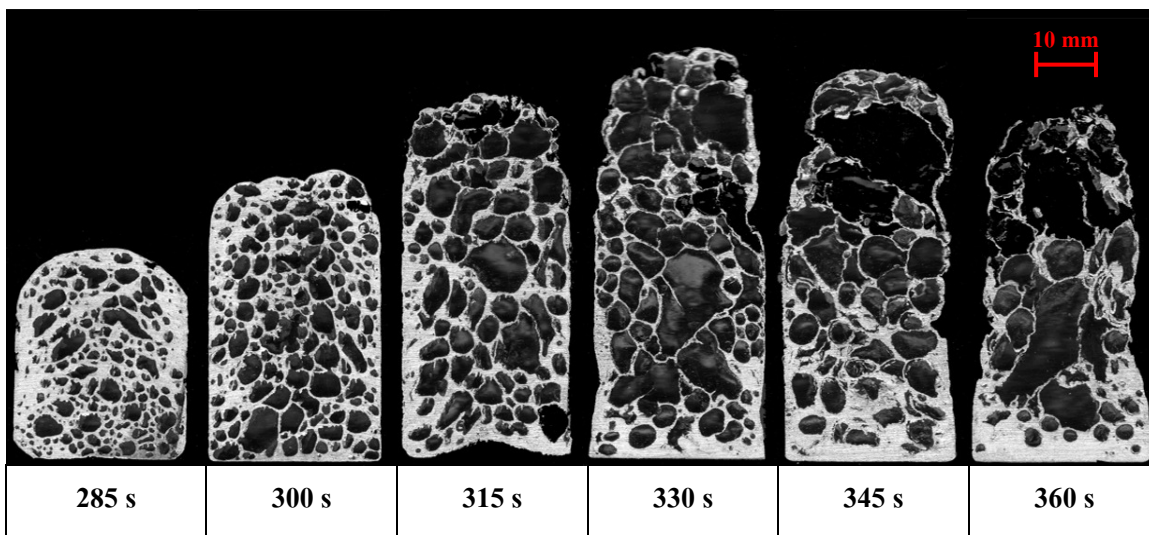
นอกจากนี้ยังเกิดการไหลของอะลูมิเนียมเหลวเนื่องจากแรงโน้มถ่วงค่อนข้างมากทั่วทั้งโฟมอะลูมิเนียมสังเกตได้จากความหนาที่เพิ่มมากขึ้นของผนังโพรงอากาศและความหนาที่ฐานของโฟม ทำให้โฟมขาดเสถียรภาพซึ่งเมื่อถึงช่วงยุบตัวโฟมจะยุบตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้



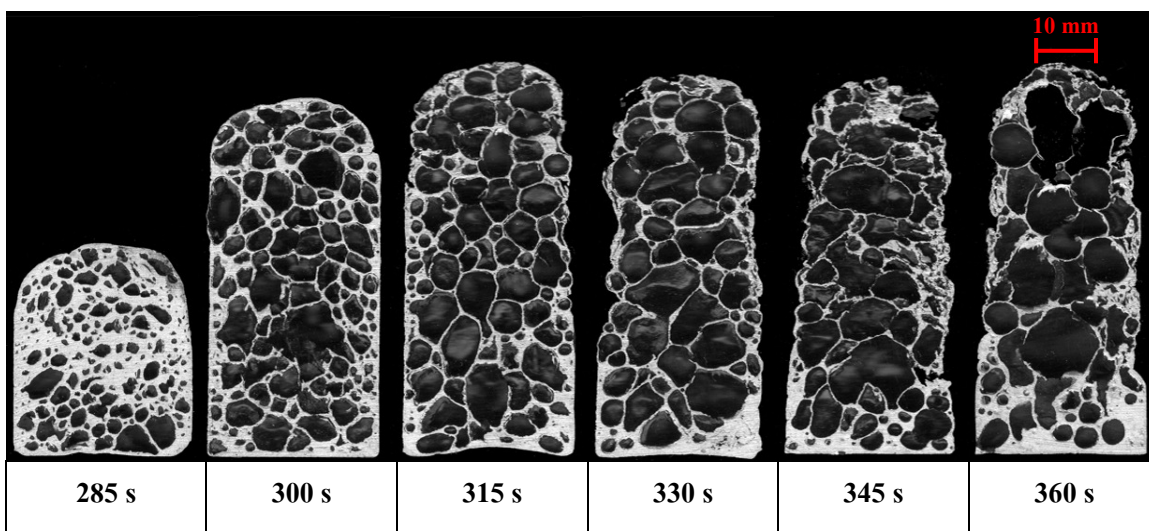
รูปที่ 4.4 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่เวลาต่างๆ

เมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้แก่โฟมอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าโครงสร้างที่เวลา 315 วินาที ซึ่งโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินามีการขยายตัวสูงสุด ซึ่งโพรงอากาศมีขนาดใหญ่จากการรวมตัวกันของโพรงอากาศจำนวนมากไม่ต่างจากโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพรงอากาศมีรูปร่างไม่แน่นอนเนื่องจากการไหลของอะลูมิเนียมเหลว แต่ความหนาของโพรงอากาศน้อยลงรวมทั้งความหนาที่ฐานของโฟมเช่นกันทำให้โฟมอะลูมิเนียมมีเสถียรภาพมากขึ้นแม้จะไม่มากก็ตาม หลังจากนั้นจะเกิดการยุบตัวอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับในโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมอนุภาคซิลิกาลงไปโฟมอะลูมิเนียมจะทำให้โฟมมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยมีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 330 วินาที แม้ขนาดโพรงอากาศที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอนแต่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากการรวมตัวที่น้อยลงของโพรงอากาศเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่ยังเกิดการไหลของอะลูมิเนียมเหลวโดยเฉพาะที่ฐานของโฟม ซึ่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะเกิดการยุบตัวช้ากว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เนื่องจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศช้าลง



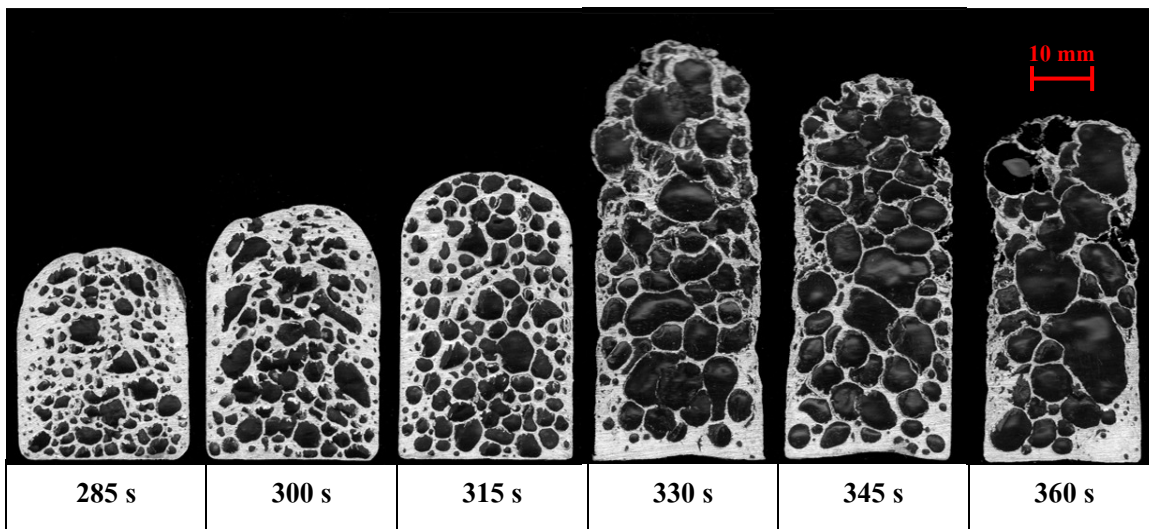
รูปที่ 4.5 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.6 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เวลาต่างๆ

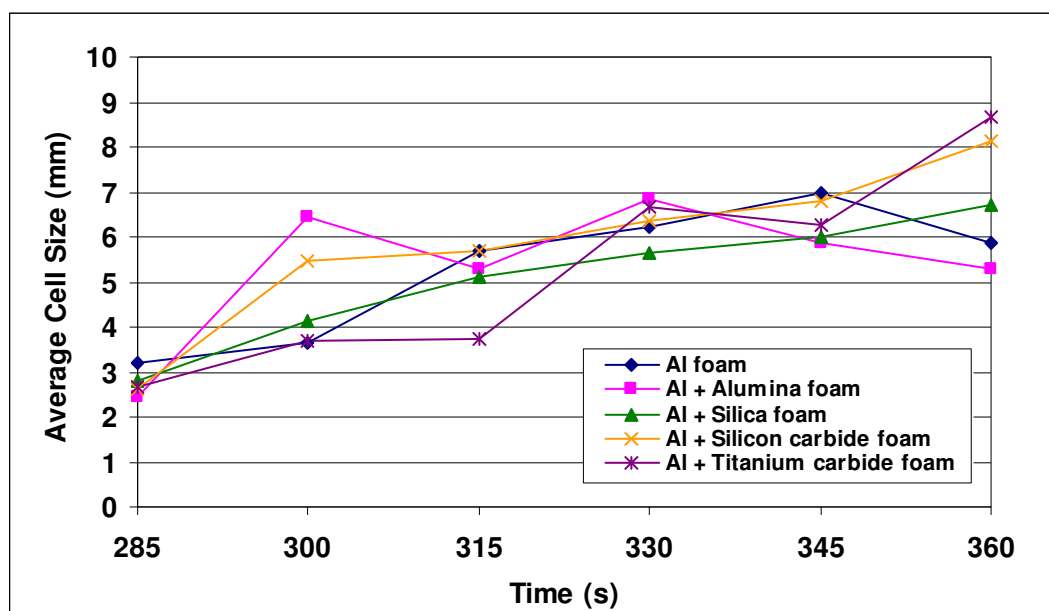
รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดการขยายตัวที่เวลาต่างๆ พบว่า ที่เวลา 315 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่มีการขยายตัวสูงสุดขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศมีความสม่ำเสมอค่อนข้างมากเนื่องจากการรวมตัวของโพรงอากาศลดลงค่อนข้างมาก อีกทั้งการไหลของอะลูมิเนียมเหลวทั่วทั้งโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ยังน้อยลงอย่างมาก แม้จะอยู่ในช่วงของการยุบตัว โฟมก็ยังคงมีเสถียรภาพที่ดี ดังนั้นการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จึงช่วยให้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีเสถียรภาพสูงขึ้นอย่างชัดเจน





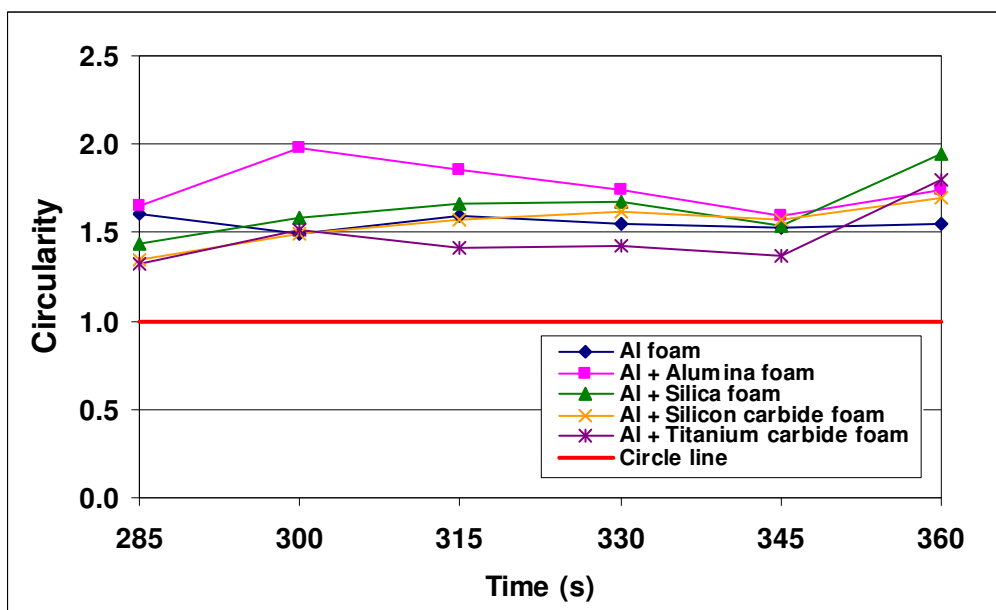
รูปที่ 4.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดการขยายตัวที่เวลาต่างๆพบว่า ที่เวลา 330 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่มีการขยายตัวสูงสุดโพรงอากาศมีขนาดค่อนข้างใหญ่ไม่สม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่ค่อยแน่นอนเนื่องจากการรวมตัวของโพรงอากาศ แม้จะไม่มากเท่ากับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ก็ตาม อีกทั้งยังเกิดการไหลอะลูมิเนียมเหลวทั่วทั้งโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์โดยเฉพาะที่ฐานของโฟมค่อนข้างชัดเจน แต่ในช่วงของการยุบตัวโฟมก็ยังคงมีเสถียรภาพที่ดีโดยเกิดการยุบตัวอย่างช้าๆหลังการขยายตัวสูงสุด



รูปที่ 4.8 แสดงขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 4.8 แสดงขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมที่เวลาต่างๆ ซึ่งการวัดขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยใช้หลักการตาม ASM (ดูได้จากภาคผนวก ข) พบว่า ในช่วงที่โฟมขยายตัวโพรงอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนกระทั่งในช่วงที่เกิดการยุบตัวอาจมีขนาดเล็กลงหรือใหญ่ขึ้นก็ได้ ถ้าใหญ่ขึ้นเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศ แต่ถ้ามีขนาดเล็กลงเกิดจากการยุบตัวที่รวดเร็วของโฟม โดยจากตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบกันที่เวลาที่มีการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมสูงที่สุดแสดงให้เห็นว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีขนาดโพรงอากาศใหญ่ที่สุด ส่วนโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินามีขนาดโพรงอากาศเล็กที่สุด



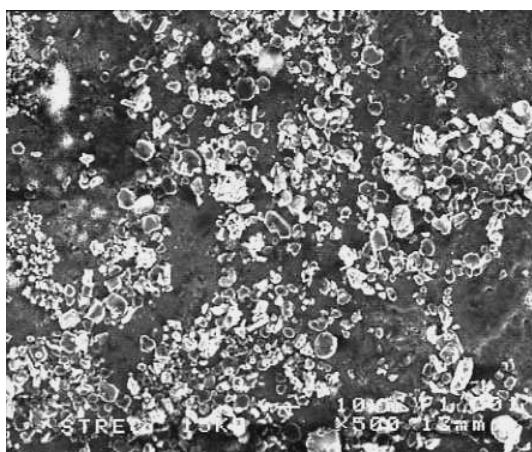
รูปที่ 4.9 ความเป็นวงกลมของโพรงอากาศที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 4.9 แสดงความเป็นวงกลมของโพรงอากาศที่เวลาต่างๆ พบว่า นอกจากโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แล้วที่เวลาก่อนการขยายตัวสูงสุดโพรงอากาศจะมีความเป็นวงกลมมากที่สุด หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มความเป็นวงกลมน้อยลงเรื่อยๆ ยกเว้นในโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาและไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งจะมีความเป็นวงกลมมากขึ้นแล้วจึงลดลงในช่วงสุดท้าย โดยจากตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบกันที่เวลาที่มีการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมสูงที่สุดแสดงให้เห็นว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินามีความเป็นวงกลมต่ำที่สุดและโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีความเป็นวงกลมสูงที่สุด

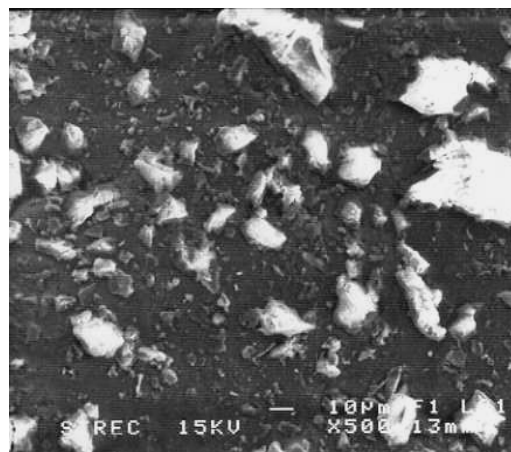
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยและความกลมของโพรงอากาศที่การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียม

ชิ้นงาน	Time (s)	Amount of cell	S.D. cell size (mm)	Average cell size (mm)	Circularity
Al foam	315	45	3.26	5.67	1.59
Al + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam	315	50	2.87	5.31	1.85
Al + SiO <sub>2</sub> foam	330	50	3.51	5.66	1.68
Al + SiC foam	315	50	3.14	5.69	1.57
Al + TiC foam	330	30	3.00	6.65	1.42

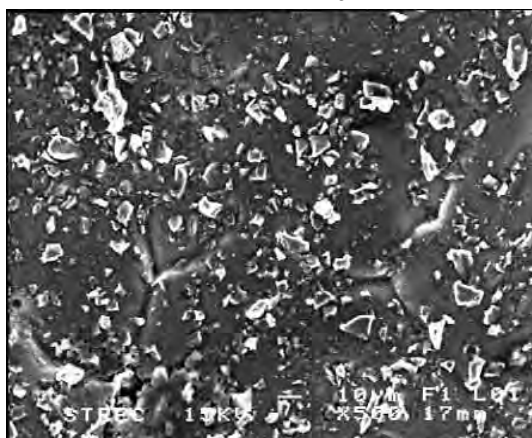
#### 4.3.2 การกระจายตัวของอนุภาคบนผิวของผนังโพรงอากาศ



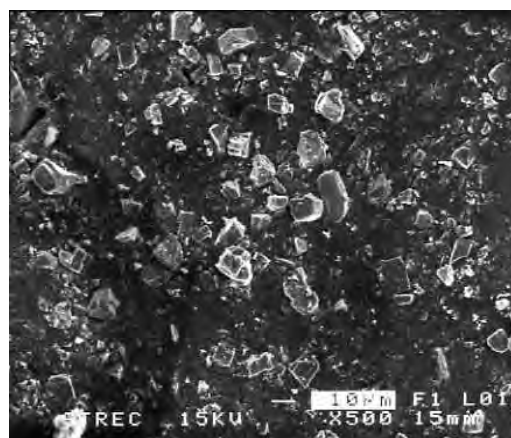
(ก) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



(ข) SiO<sub>2</sub>



(ค) SiC



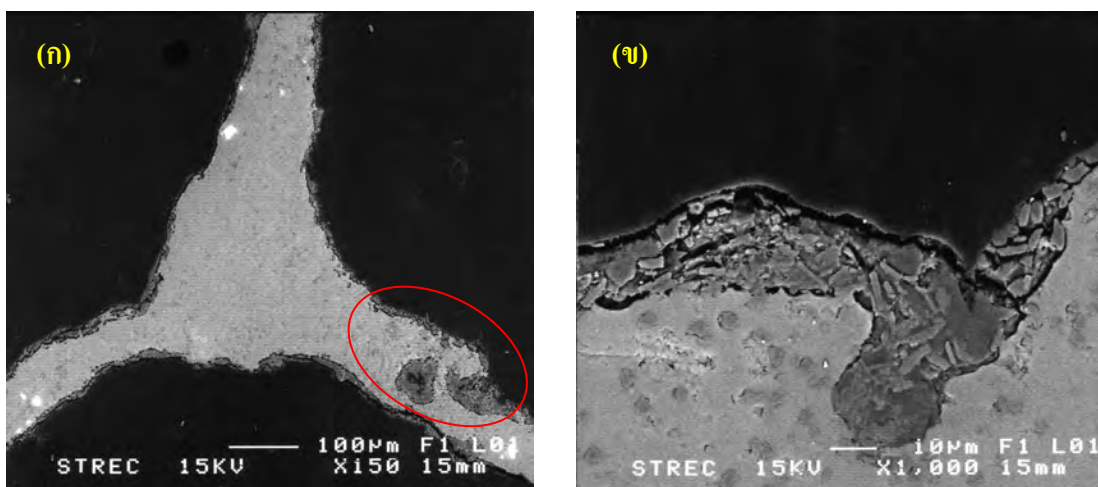
(ง) TiC

รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกบนผนังโพรงอากาศที่กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆบนผิวของผนังโพรงอากาศพบว่า อนุภาคอะลูมินามีการเกาะกลุ่มหนาแน่นที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่นๆ ส่วนอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และซิลิกามีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอที่สุดทั่วทั้งผิวของโพรงอากาศแต่ อนุภาคซิลิกามีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่าและมีอนุภาคขนาดต่างๆกันกระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก สำหรับในกรณีของอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีการกระจายตัวหนาแน่นในบางพื้นที่

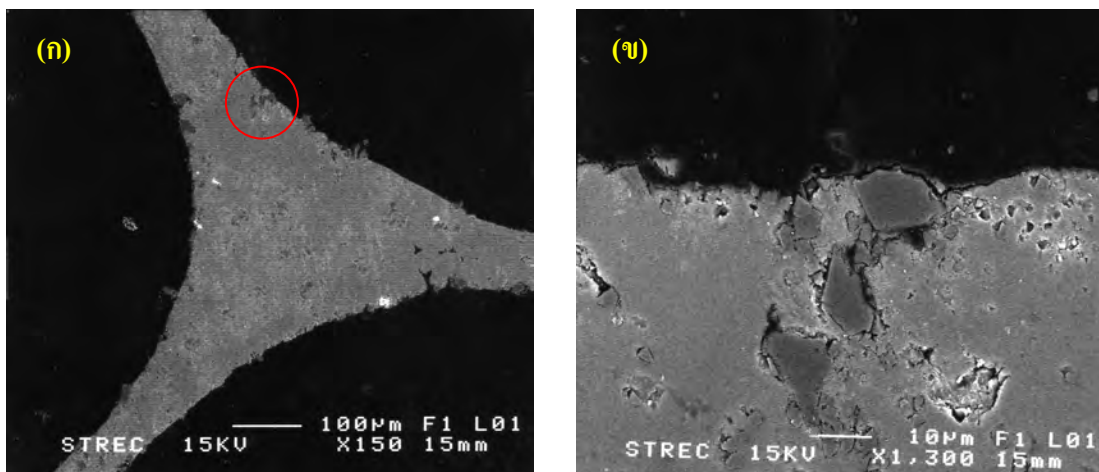
นอกจากนี้การฝังตัวของอนุภาคจะสังเกตจากอนุภาคที่อยู่บนผิวครึ่งหนึ่งส่วนอีกครึ่งหนึ่งฝังตัวอยู่ในผิวของผนังโพรงอากาศสังเกตเห็นว่าอนุภาคซิลิกาและอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีจำนวนอนุภาคลักษณะดังกล่าวบนผิวของผนังโพรงอากาศมากกว่าอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นจึงมีการฝังตัวที่ดีกว่า ส่วนอนุภาคอะลูมินาพบจำนวนอนุภาคที่ฝังตัวค่อนข้างน้อยมากจึงมีการฝังตัวที่แย่มากที่สุด

### 4.3.3 การยึดเกาะของอนุภาคเซรามิกบน Plateau border



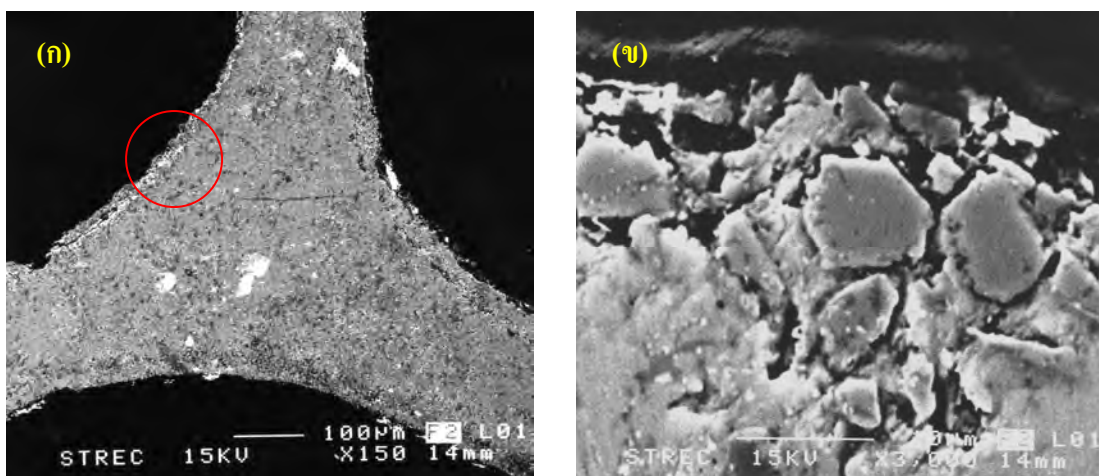
รูปที่ 4.11 การยึดเกาะของอนุภาคอะลูมินาบน โฟมอะลูมิเนียมบริเวณ Plateau border ที่กำลังขยาย (ก) 150 และ (ข) 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการยึดเกาะของอนุภาคอะลูมินาบน โฟมอะลูมิเนียมบริเวณ Plateau border (ก) เห็นได้ชัดว่ามีการเกาะของอะลูมินาเป็นแถบส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิว (ในวงกลมสีแดง) พบการฝังตัวในเนื้ออะลูมิเนียมค่อนข้างน้อยซึ่งเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 เท่า (ข) พบว่าชั้นดังกล่าวเป็นการรวมตัวของอนุภาคอะลูมินาจำนวนมากซึ่งบริเวณรอยต่อมีช่องว่างระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมค่อนข้างมาก



รูปที่ 4.12 การขีดเกาะของอนุภาคซิลิกาบนโฟมอะลูมิเนียมบริเวณ Plateau border ที่กำลังขยาย (ก) 150 และ (ข) 1300 เท่า

รูปที่ 4.12 (ก) แสดงลักษณะการขีดเกาะของอนุภาคซิลิกาบนโฟมอะลูมิเนียมพบว่า อนุภาคซิลิกามีการขีดเกาะบริเวณ plateau border โดยมีจำนวนอนุภาคในแต่ละบริเวณค่อนข้างน้อยส่วนใหญ่อยู่อันบริเวณผิว (ในวงกลมสีแดง) เมื่อสังเกตบริเวณเนื้อพื้นอะลูมิเนียมด้วยการเพิ่มกำลังขยายเป็น 1300 เท่า (ข) แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคเล็กๆ เกาะติดมาด้วยและยังมีช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียมอยู่พอสมควร ด้วยเหตุนี้การขีดเกาะระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิกาจึงมีการขีดติดเพียงบางส่วนไม่ทั่วทั้งอนุภาคแม้จะมีการฝังตัวที่ค่อนข้างลึกก็ตาม

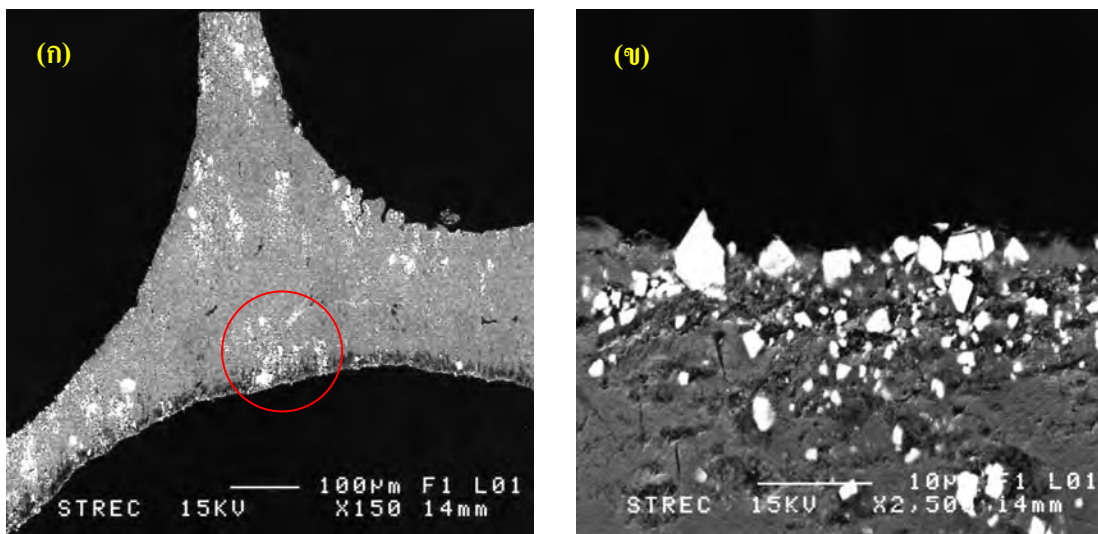


รูปที่ 4.13 การขีดเกาะของอนุภาคซิลิกอนคาร์บอนบนโฟมอะลูมิเนียมบริเวณ Plateau border ที่กำลังขยาย (ก) 150 และ (ข) 3000 เท่า

รูปที่ 4.13 (ก) แสดงลักษณะการขีดเกาะของอนุภาคซิลิกอนคาร์บอนบนโฟมอะลูมิเนียมพบว่า อนุภาคซิลิกอนคาร์บอนมีการขีดเกาะบริเวณ plateau border โดยมีจำนวนอนุภาคในแต่ละบริเวณเป็นกลุ่มแต่ไม่มีการขีดเกาะกันระหว่างอนุภาค (ในวงกลมสีแดง) เมื่อสังเกตบริเวณเนื้อพื้น

อะลูมิเนียมด้วยการเพิ่มกำลังขยายเป็น 3000 เท่า (ข) แสดงให้เห็นว่าการฝังตัวของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียมพอสมควรและบริเวณที่มีอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ยึดเกาะพื้นผิวจะมีลักษณะค่อนข้างขรุขระทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียมอยู่บ้าง ด้วยเหตุนี้การยึดเกาะระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จึงมีการยึดเกาะได้ไม่ทั่วทั้งอนุภาค

รูปที่ 4.14 (ก) แสดงลักษณะการยึดเกาะของอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์บนโพลีอะลูมิเนียมสังเกตเห็นว่าการกระจายตัวของไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ผิวและการฝังตัวในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริเวณ plateau border เป็นจำนวนมาก (ในวงกลมสีแดง) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 2500 เท่าดังรูปที่ 4.14 (ข) พบว่าอนุภาคขนาดใหญ่กว่าจะยึดเกาะบริเวณผิวจากนั้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะกระจายฝังตัวเข้าไปในเนื้อพื้น อีกทั้งช่องว่างระหว่างอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์กับเนื้อพื้นอะลูมิเนียมยังมีค่อนข้างน้อยอีกด้วย



รูปที่ 4.14 การยึดเกาะของไทเทเนียมคาร์ไบด์บนโพลีอะลูมิเนียมบริเวณ Plateau border ที่กำลังขยาย (ก) 150 และ (ข) 2500 เท่า

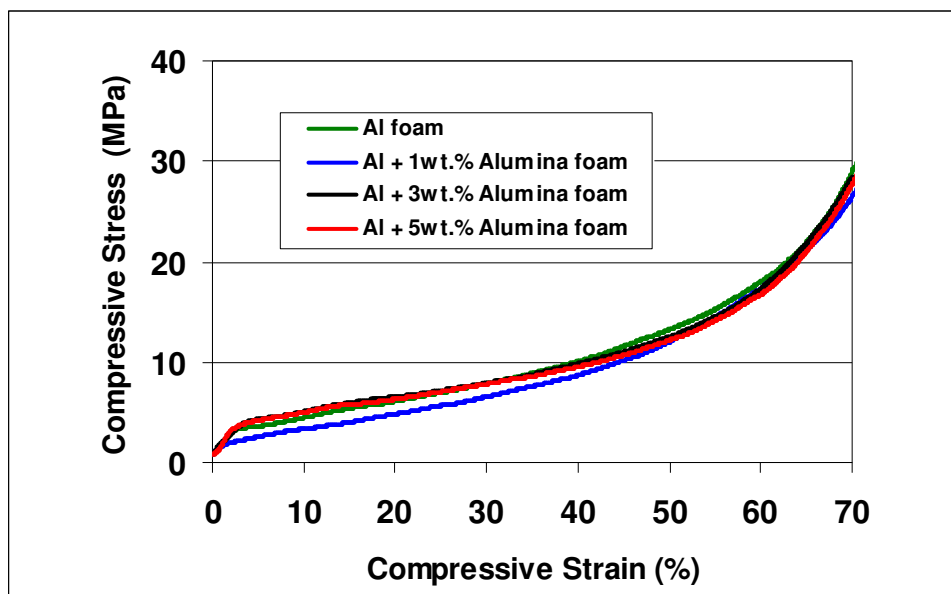
## 4.4 สมบัติทางกล

### 4.4.1 ความแข็งแรงอัด

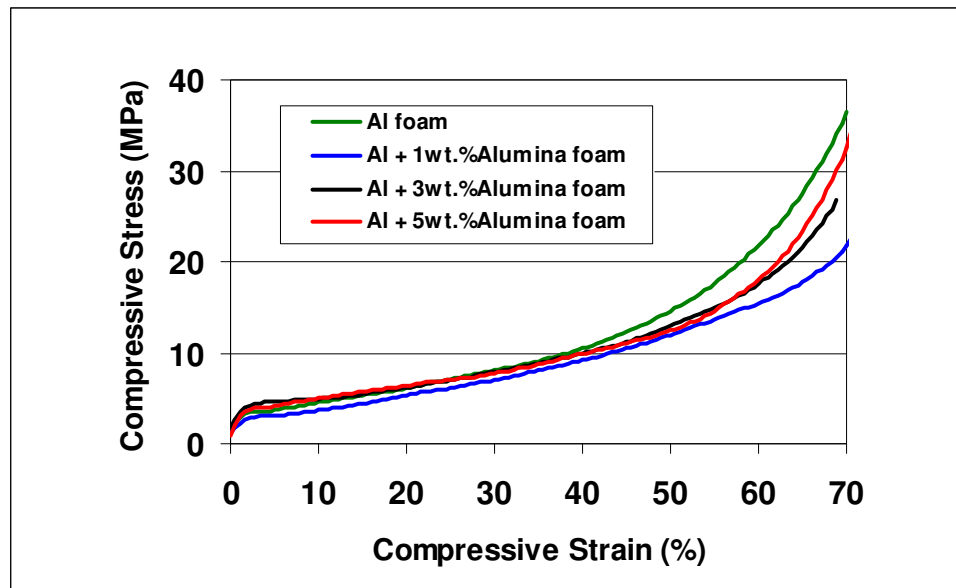
#### 4.4.1.1 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณ 1 wt.% 3 wt.% และ 5 wt.% ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min พบว่าเมื่อเติมอนุภาคอะลูมินา 1 wt.% ลงในโฟมอะลูมิเนียมจะทำให้ความแข็งแรงอัดลดลง แต่เมื่อเติมมากขึ้นความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนแทบไม่เห็นความแตกต่างเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ในกรณีที่เพิ่มความเร็วจากเดิม 10 เท่าเป็น 50 mm/min ดังรูปที่ 4.16 พบว่าในช่วงระหว่างความเครียด 10% ถึง 40% ความเค้นอัดที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงความเครียดหลังจากนั้นความเค้นจะเพิ่มขึ้นเร็วมากเนื่องจากโพรงอากาศเกิดการยุบตัวจนหมดซึ่งในช่วงนี้การเติมอนุภาคอะลูมินานอกจากไม่ส่งผลให้ความเค้นเพิ่มขึ้นแล้วแต่ยังมีค่าน้อยลงอีกด้วย นอกจากนี้ความเค้นที่ความเครียดสุดท้ายหรือที่ความเครียด 70% มีค่าโดยรวมสูงกว่าความเค้นที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min



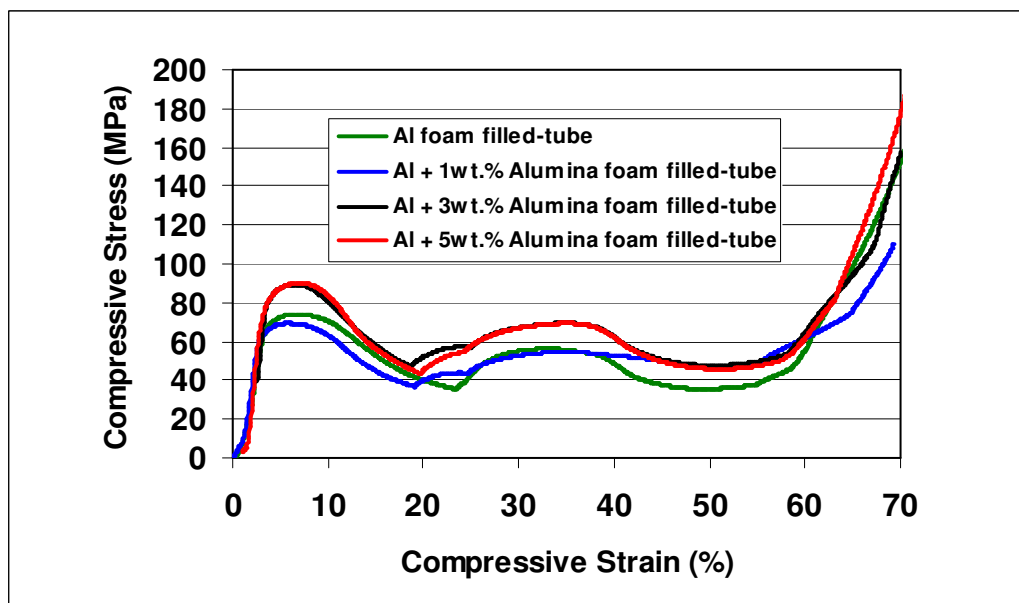
รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min



รูปที่ 4.16 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

#### 4.4.1.2 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

และ 50 mm/min

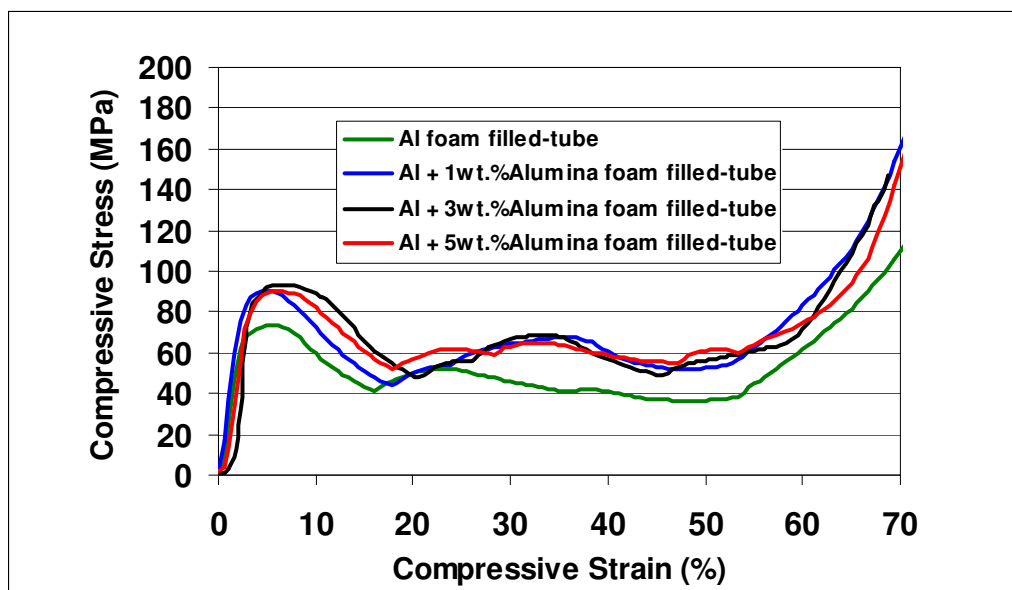


รูปที่ 4.17 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min



เมื่อนำโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินามาใส่ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 สามารถเปรียบเทียบความแข็งแรงอัดเมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ดังรูปที่ 4.17 โดยเมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงอัดมากขึ้นตามไปด้วย ยกเว้นที่ปริมาณอะลูมินา 1% โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงอัดจะใกล้เคียงกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งต่างจากโฟมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้นำมาใส่ท่อที่มีค่าความแข็งแรงอัดไม่ต่างกันมากนักเมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณต่างๆกันดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

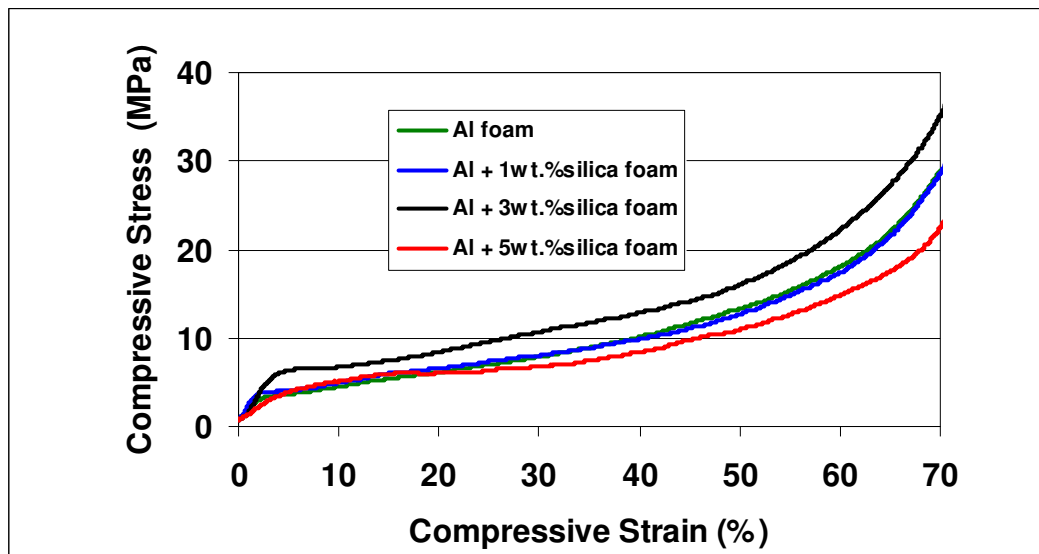
เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ใส่ท่อเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min สิ่งที่แตกต่างกันออกไปคือ หากเติมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณมากขึ้นจะเพิ่มความแข็งแรงอัดเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อโดยรวมประมาณ 30% แต่เมื่อเทียบกันระหว่างโฟมอะลูมิเนียมที่เติมอนุภาคอะลูมินาในปริมาณต่างๆกันยังมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าที่ปริมาณอะลูมินาเท่าใดช่วยเพิ่มความแข็งแรงอัดได้มากที่สุด ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

#### 4.4.1.3 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ

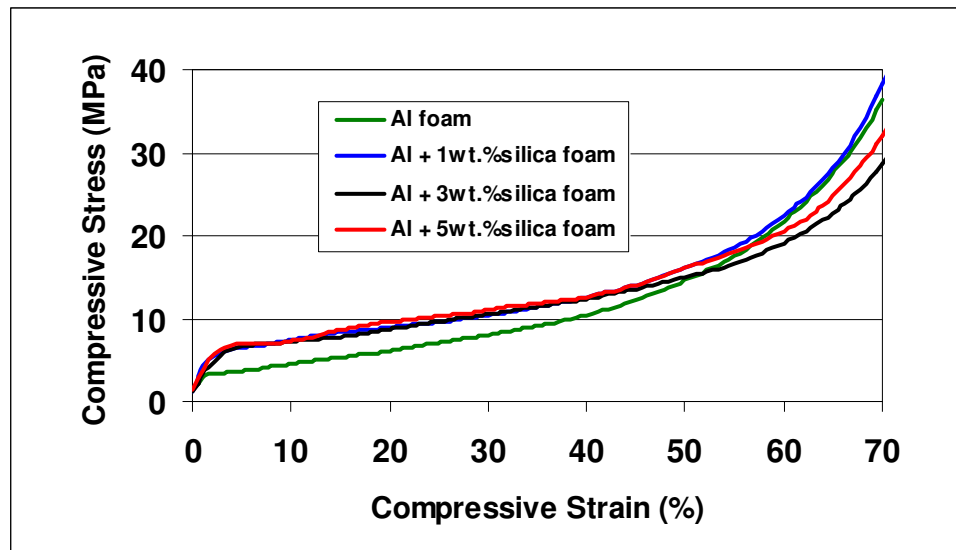
50 mm/min



รูปที่ 4.19 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

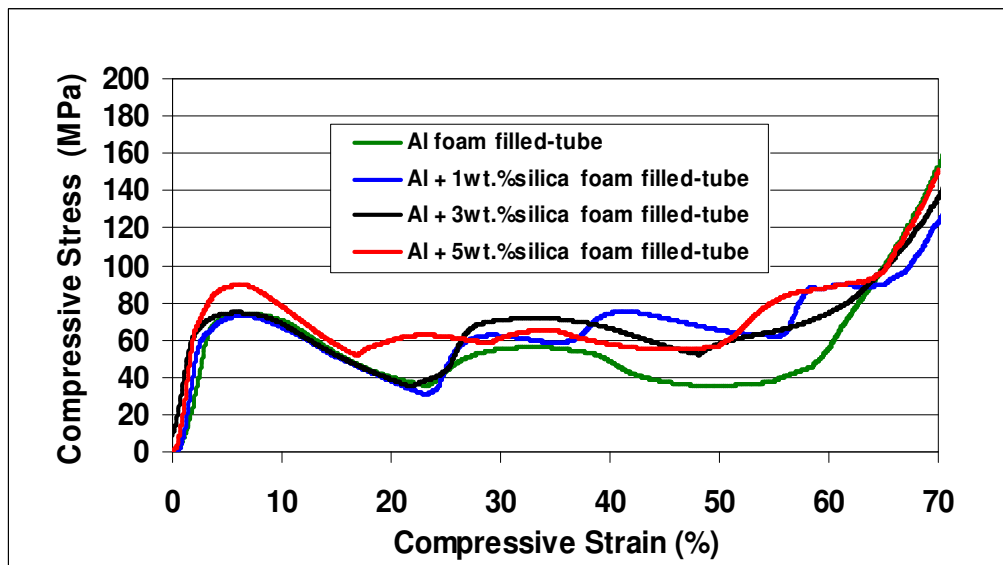
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความแข็งแรงอัดระหว่างโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในปริมาณต่างๆกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min พบว่าความเค้นเมื่อเติมอนุภาคซิลิกา 1 wt.% มีค่าใกล้เคียงกับความเค้นรวมของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งการเติมอนุภาคซิลิกา 3 wt.% ทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่หากเติมอนุภาคซิลิกาถึง 5% โดยน้ำหนักความเค้นรวมลดลงน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เล็กน้อย

โดยเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min ดังรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมอนุภาคซิลิกาในปริมาณต่างๆจะมีความเค้นที่สูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยเฉพาะในช่วงที่มีความเค้นค่อนข้างคงที่หรือที่เรียกว่า ความเค้นพลาโต (plateau stress) ซึ่งความเค้นรวมยังมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min อีกด้วย

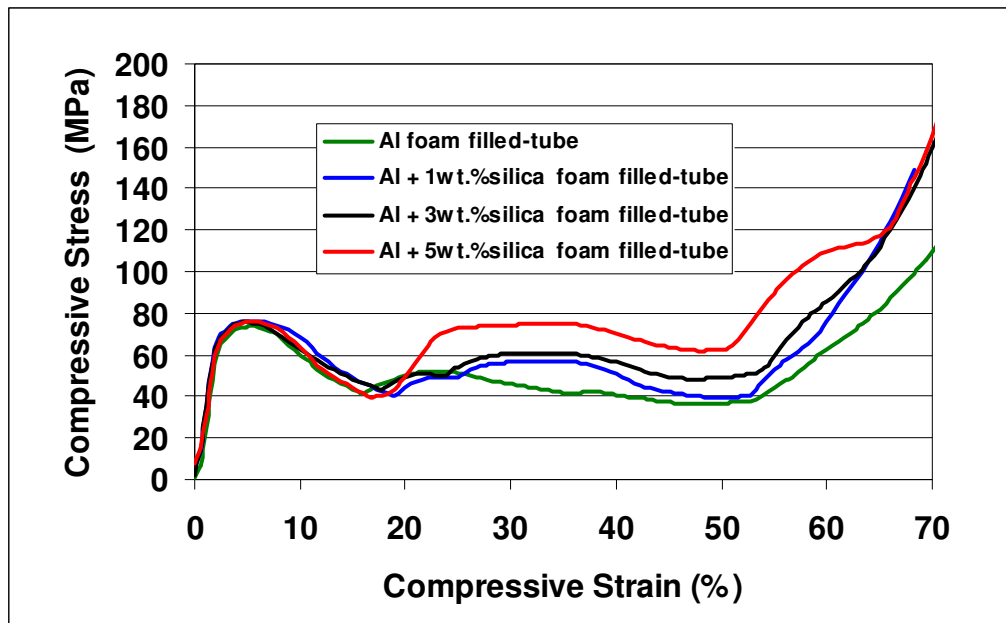


รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

#### 4.4.1.4 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min



รูปที่ 4.21 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

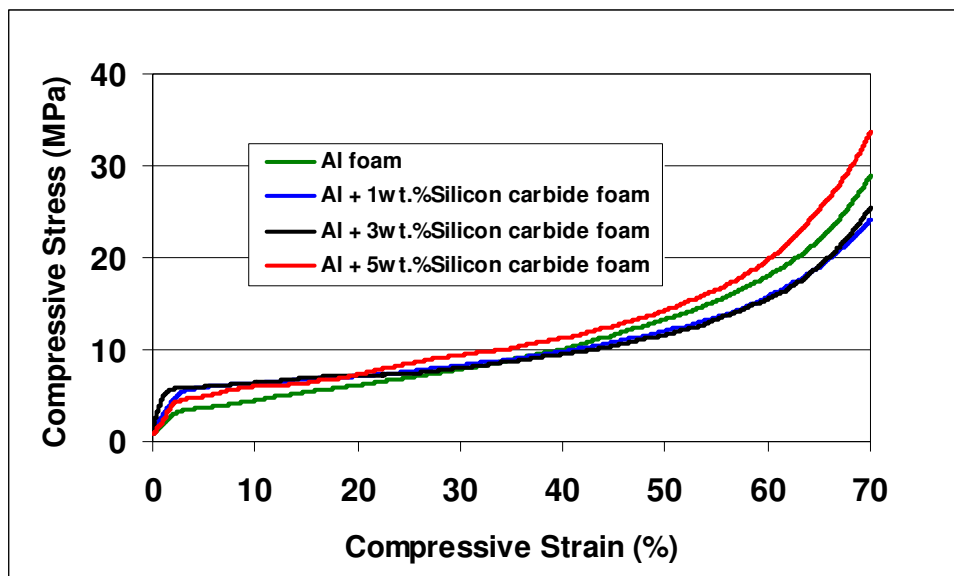


รูปที่ 4.22 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อที่ปริมาณต่างๆเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อ พบว่า ความเค้นรวมเมื่อมีการเติมอนุภาคซิลิกาในปริมาณต่างๆลงในโฟมอะลูมิเนียมในท่อมีค่ามากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อทั้งสิ้น โดยเฉพาะหลังการตำแหน่งสูงสุดแรกของกราฟจะเห็นความแตกต่างได้ชัด แต่ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อด้วยปริมาณที่ต่างกัน เห็นได้ว่ามีความเค้นที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยหากเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min ดังรูปที่ 4.22 ความเค้นรวมของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อมีค่ามากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อ ความแตกต่างระหว่างโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อในปริมาณต่างๆจะเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกามากขึ้นที่ประมาณ 20% ของความเครียด ทำให้ค่าความเค้นรวมเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง

#### 4.4.1.5 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

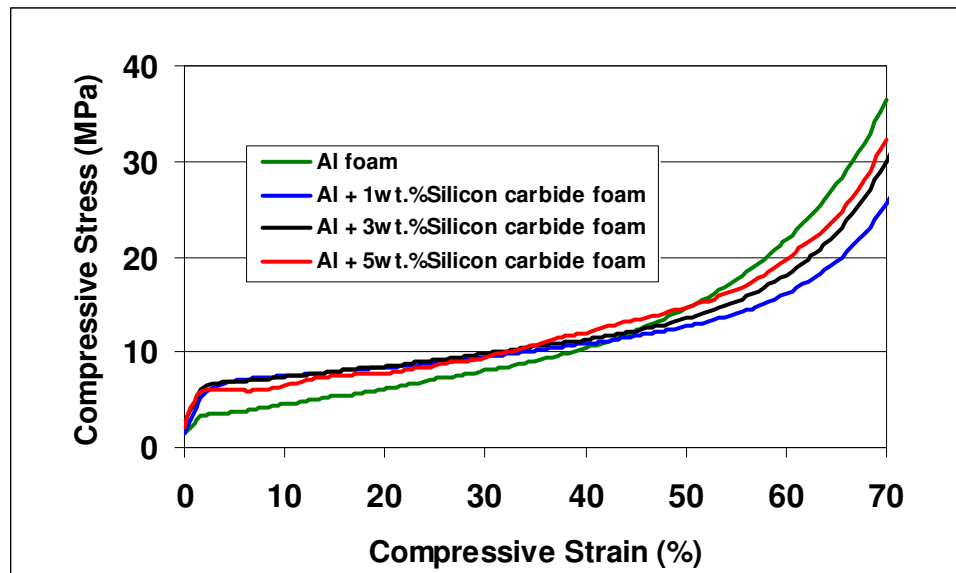
และ 50 mm/min



รูปที่ 4.23 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

รูปที่ 4.23 แสดงความแข็งแรงอัดเมื่อโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆกันที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min พบว่าในโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีความเค้นรวมมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยเฉพาะที่ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 5 wt.% จะให้ค่าความเค้นที่สูงที่สุดตั้งแต่ที่ 20% ของความเครียดเป็นต้นไป ต่างจากที่ 1 wt.% และ 3 wt.% ที่มีค่าความเค้นรวมใกล้เคียงกันมาก

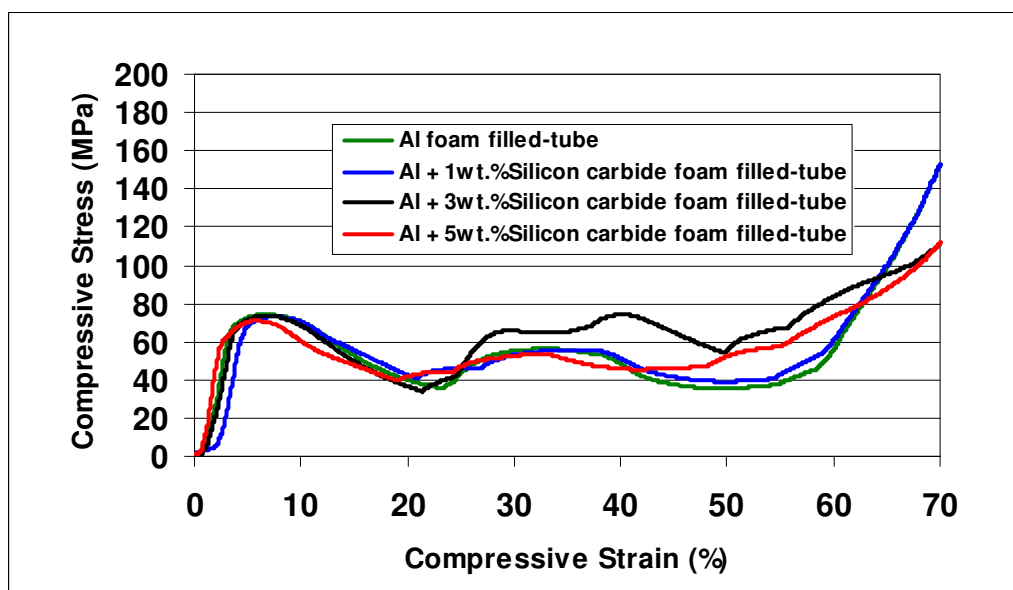
เมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min ดังรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆจะมีความเค้นรวมที่สูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยเฉพาะในช่วงที่มีความเค้นค่อนข้างคงที่หรือที่เรียกว่า ความเค้นพลาโต (plateau stress) ดังนั้นแม้ว่าความแข็งแรงอัดโดยรวมจะไม่แตกต่างกันมากนักแต่ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งความเค้นรวมสูงกว่าในกรณีที่ใช้ความเร็วหัวกด 5 mm/min อีกด้วย



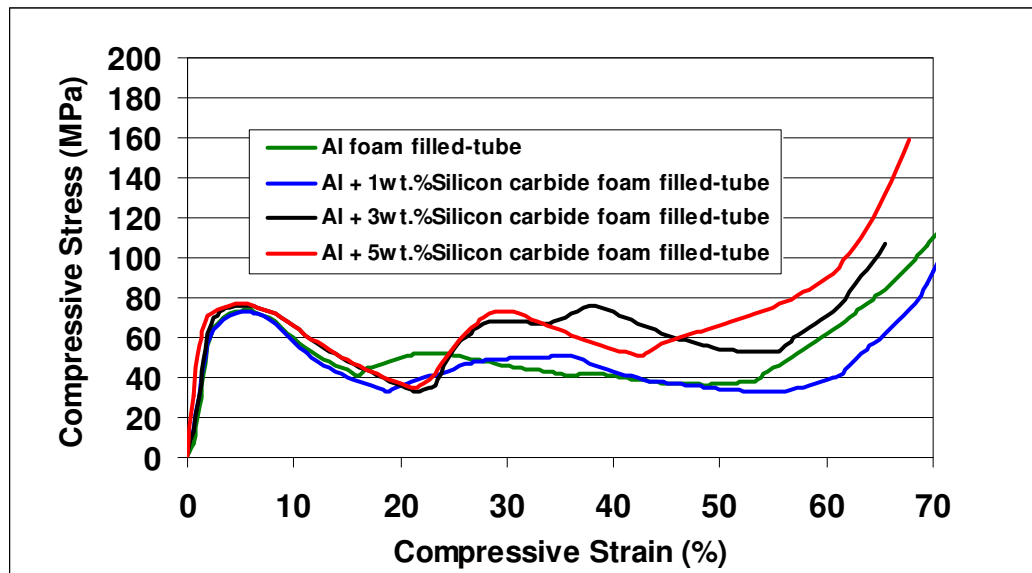
รูปที่ 4.24 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

#### 4.4.1.6 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อที่ความเร็วหัวกด

5 mm/min และ 50 mm/min



รูปที่ 4.25 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

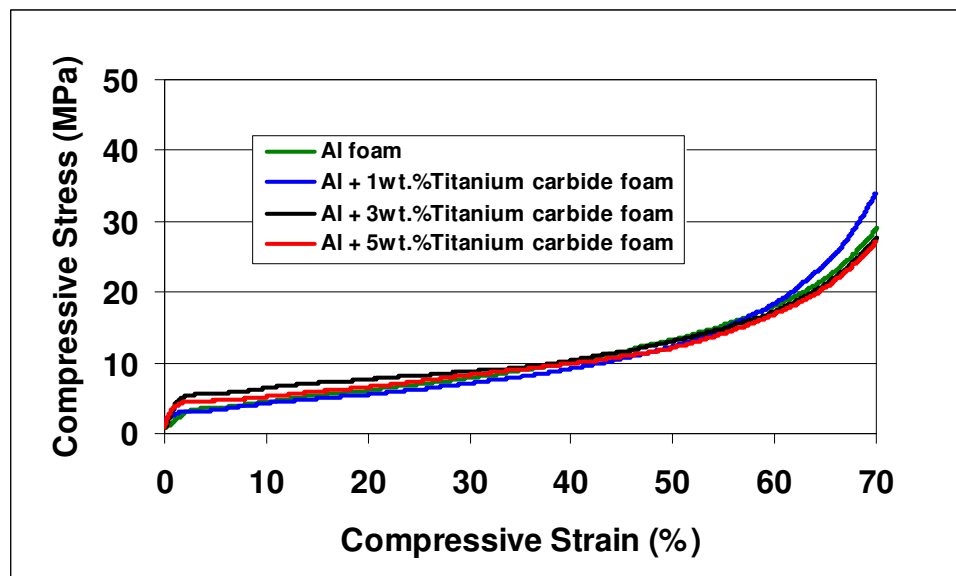


รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

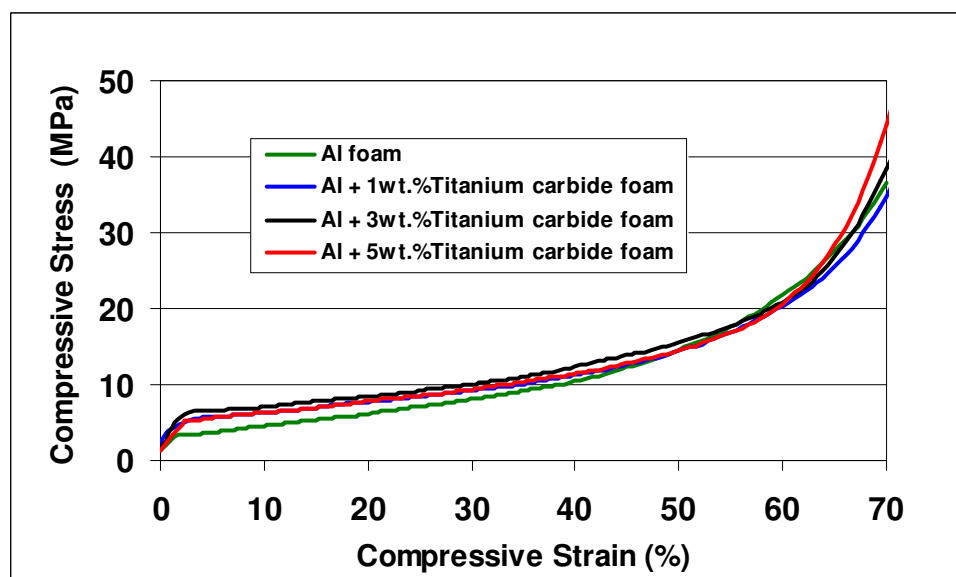
รูปที่ 4.25 แสดงความแข็งแรงอัดเมื่อโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆกันที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min พบว่าหากเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 1 wt.% จะมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่ออย่างมาก อาจเรียกได้ว่าแทบไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงอัดเลยก็ได้ ส่วนการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 3 wt.% และ 5 wt.% นั้นมีความแข็งแรงมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อ แต่ที่ 3 wt.% กลับมีความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งจะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนตั้งแต่ที่ 20% ของความเครียดเป็นต้นไป ส่วนในรูปที่ 4.26 แสดงความแข็งแรงอัดเมื่อโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆกันโดยเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min พบว่าเมื่อเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 1% จะมีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min แต่ในส่วนของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 3 wt.% และ 5 wt.% ในท่อมี่ค่าความแข็งแรงตั้งแต่ 20% ของความเครียดมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์อย่างชัดเจน และที่ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 5 wt.% มีความแข็งแรงสูงสุด

#### 4.4.1.7 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกด

5 mm/min และ 50 mm/min



รูปที่ 4.27 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min



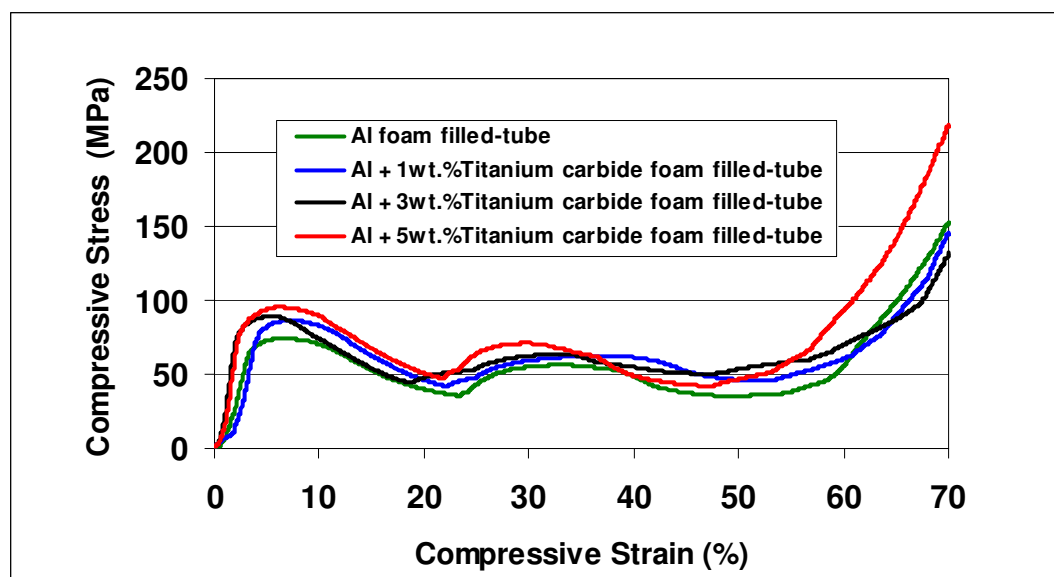
รูปที่ 4.28 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min



รูปที่ 4.27 และ รูปที่ 4.28 แสดงความแข็งแรงอัดเมื่อโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆกันที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min และ 50 mm/min ตามลำดับพบว่าทั้งสองความเร็วหัวกดนี้มีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆ มีความเค้นรวมสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างชัดเจน แต่ไม่ว่าเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ปริมาณเท่าใดความเค้นรวมก็แทบไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยกัน เพียงแต่ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min ทั้งโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์และ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความเค้นรวมสูงกว่าที่ความเร็ว 5 mm/min

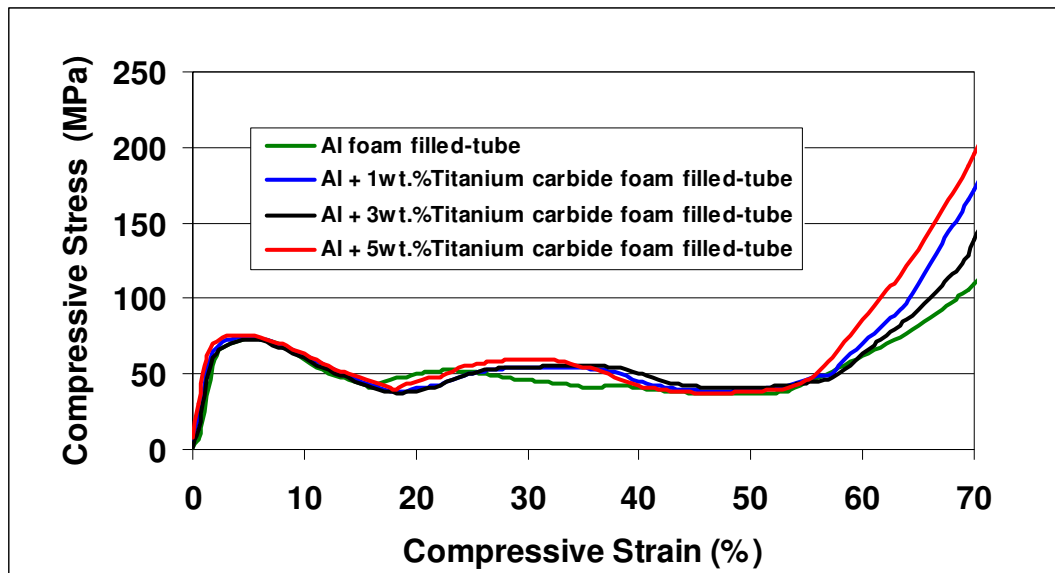
#### 4.4.1.8 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อที่ความเร็วหัวกด

5 mm/min และ 50 mm/min



รูปที่ 4.29 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

จากรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่า ความเค้นรวมของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีค่ามากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อประมาณ 30% แต่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ปริมาณ 1 wt.% และ 3 wt.% ในท่อมักมีความเค้นใกล้เคียงกันค่อนข้างมาก ส่วนที่ปริมาณ 5 wt.% มีความเค้นรวมมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัด

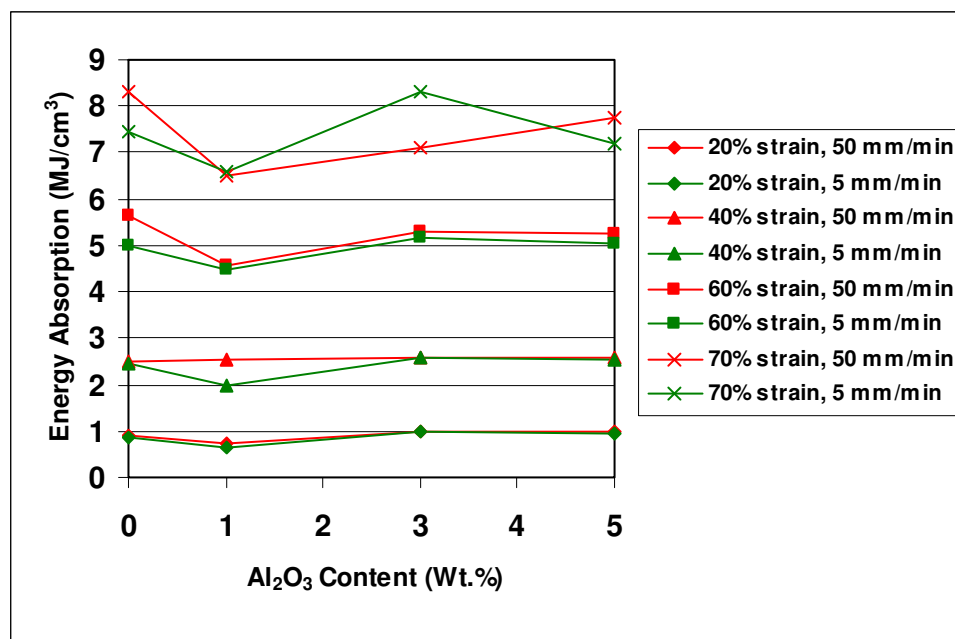


รูปที่ 4.30 ความแข็งแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่า ความเค้นรวมของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อในปริมาณต่างๆเมื่อมีความเร็วหัวกด 50 mm/min กลับมีความเค้นรวมที่ใกล้เคียงกันมาก แม้จะพบว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อมีความเค้นมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อหลังช่วงความเครียดจากการบีบอัด (Densification strain) หรือตั้งแต่ 60% ของความเครียดก็ตาม แต่ก็เป็นเพียงช่วงที่ไม่สามารถดูดซับพลังงานได้มากนัก นอกจากนี้โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ปริมาณ 1 wt.% ในท่อยังมีความเค้นรวมมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ปริมาณ 3 wt.% ในท่ออีกด้วย

## 4.4.2 การดูดซับพลังงาน

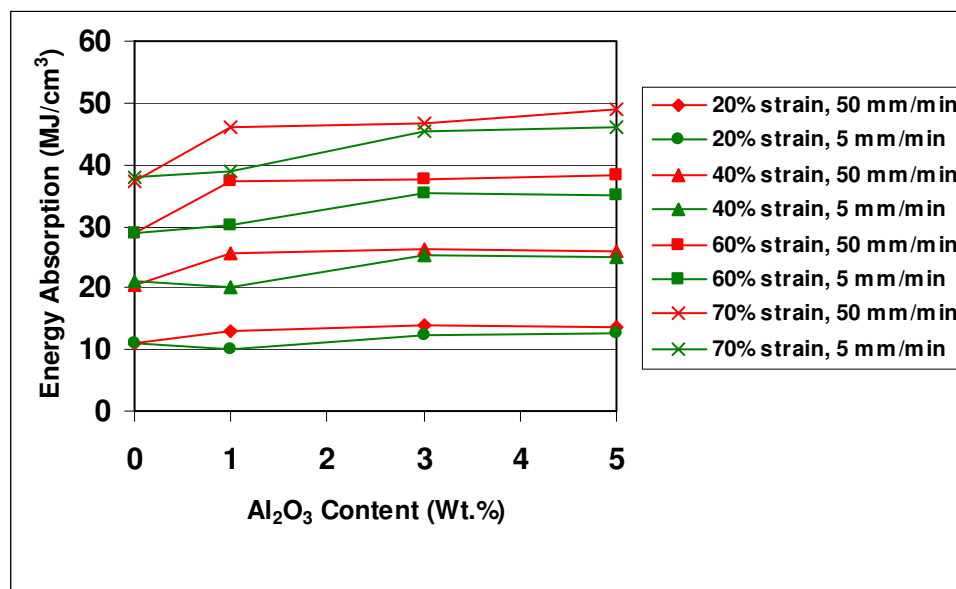
### 4.4.2.1 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินา



รูปที่ 4.31 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ปริมาณต่างกัน พบว่าที่ 20% 40% และ 60% ของความเครียด โดยที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีความสามารถในการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ไม่ว่าจะเพิ่มปริมาณอะลูมินาเท่าใดก็ตาม ซึ่งค่าการดูดซับพลังงานไม่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามปริมาณอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาปริมาณ 1 wt.% มีค่าการดูดซับพลังงานลดลงก่อนจะเพิ่มขึ้นและค่อนข้างคงที่ทั้งที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min และ 5 mm/min ส่วนที่ 70% ของความเครียด การดูดซับพลังงานไม่มีความสม่ำเสมอโดยเฉพาะที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ค่าการดูดซับพลังงานลดลงที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาปริมาณ 1 wt.% แต่กลับเพิ่มขึ้นมีค่ามากที่สุดที่ 3 wt.% และลดลงอีกครั้งที่ 5 wt.% โดยน้ำหนัก แต่ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min หลังจากการดูดซับพลังงานลดลงที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาปริมาณ 1 wt.% แล้วก็เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ 5 wt.% (ที่ปริมาณ 3 wt.% มีค่าการดูดซับพลังงานน้อยกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min แต่มากกว่าที่ปริมาณ 5 wt.%)

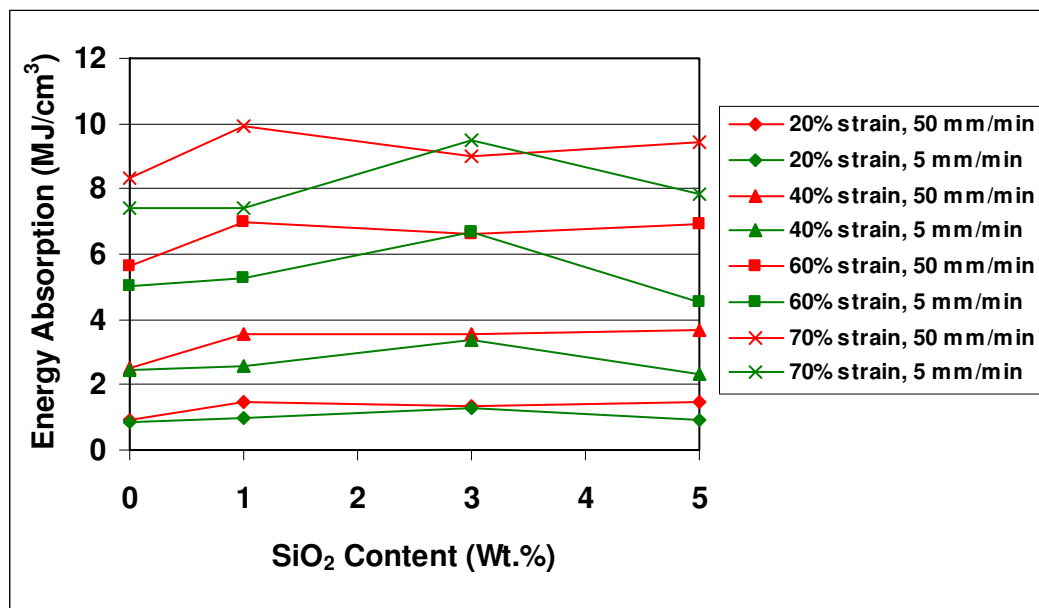
#### 4.4.2.2 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อ



รูปที่ 4.32 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อที่ปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อที่ปริมาณต่างกัน พบว่าที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ในทุกกรณี แต่ก็มีแนวโน้มเดียวกัน คือ การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะลูมินาเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่เติมอนุภาคอะลูมินา ปริมาณ 1 wt.% ถึง 3 wt.% แต่ในช่วงอื่นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนเกือบจะคงที่ ส่วนที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0 wt.% ถึง 3 wt.% หลังจากนั้นการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนเกือบจะคงที่

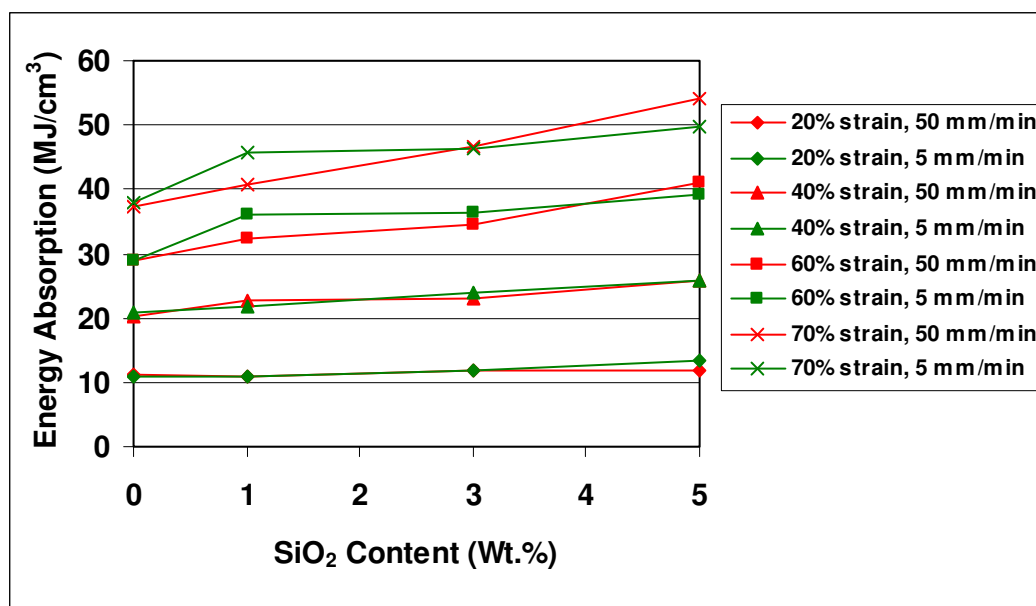
#### 4.4.2.3 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา



รูปที่ 4.33 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ปริมาณต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ทุกกรณี ยกเว้น ที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา 3 wt.% และ 70% ของความเครียด โดยลักษณะแนวโน้มของกราฟการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา 0 wt.% ถึง 1 wt.% หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นช้ามากหรือที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา 3 wt.% การดูดซับพลังงานลดลงก่อนจะเพิ่มขึ้นที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา 5 wt.% แต่ก็เพิ่มขึ้นไม่มากไปกว่าที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา 1 wt.% ส่วนที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเร็วที่สุดและสูงที่สุดที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา 3 wt.% หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในบางกรณีอาจน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ด้วย

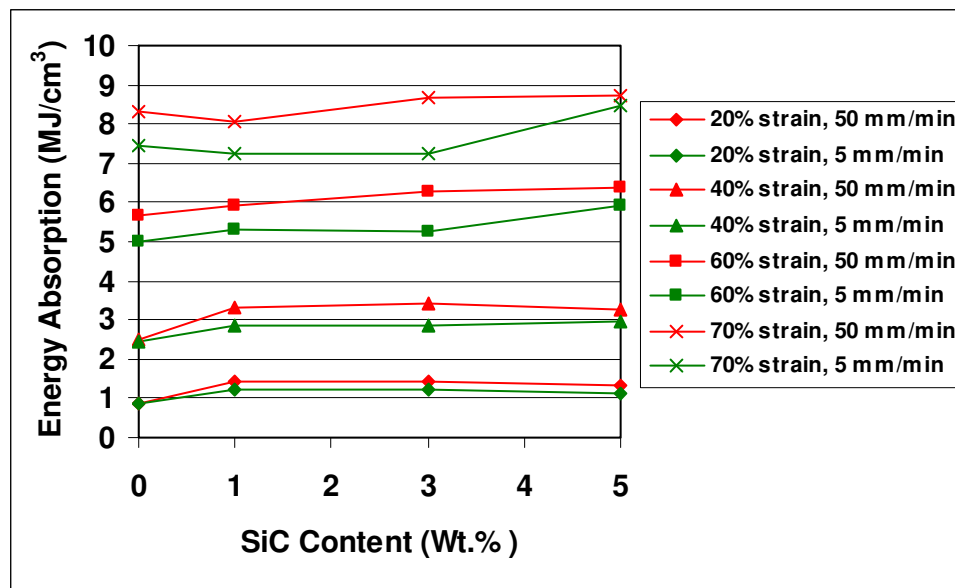
#### 4.4.2.4 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อ



รูปที่ 4.34 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อที่ปริมาณต่างกัน

เมื่อนำโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาไปใส่ท่อแล้วเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดที่ปริมาณต่างกัน ดังรูปที่ 4.34 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของการดูดซับพลังงานแตกต่างกันไปจากโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ยังไม่ใส่ท่อ โดยที่ 20% และ 40% ของความเครียด การดูดซับพลังงานใกล้เคียงกันมากแม้จะเปลี่ยนความเร็วหัวกดก็ตาม ส่วนที่ 60% และ 70% ของความเครียด มีแนวโน้มที่แตกต่างจากที่ 20% และ 40% ของความเครียด แต่มีแนวโน้มเดียวกันคือ ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นแต่ในช่วงที่มีปริมาณซิลิกาตั้งแต่ 0 wt.% ถึง 3 wt.% จะมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

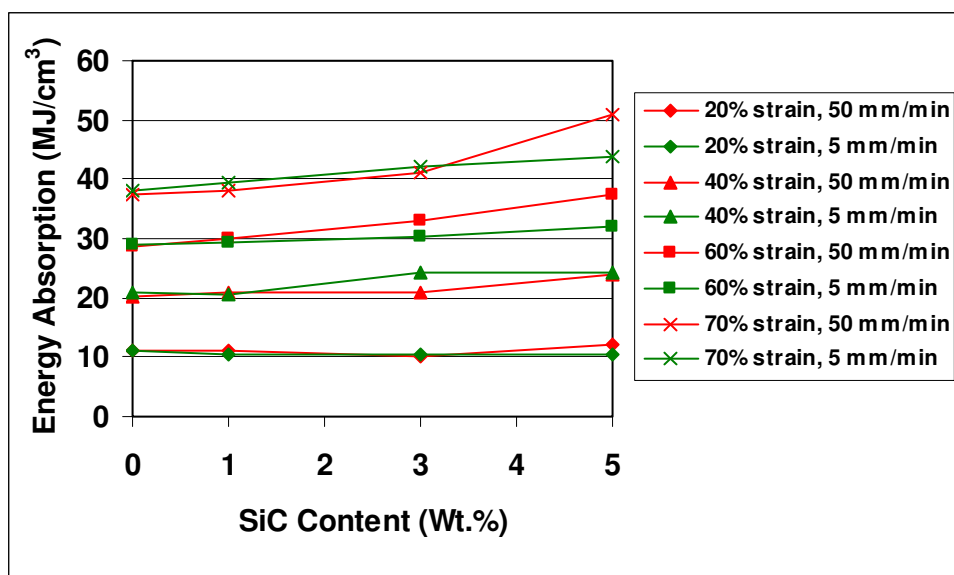
#### 4.4.2.5 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4.35 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างกัน พบว่า ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ในทุกกรณี และที่ 20% และ 40% ของความเครียด มีแนวโน้มของการดูดซับพลังงานเดียวกันคือ การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่มีปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 0 wt.% ถึง 1 wt.% จากนั้นจะค่อนข้างคงที่หรือลดลงเล็กน้อยที่ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 5 wt.% ส่วนที่ 60% และ 70% ของความเครียด มีแนวโน้มโดยประมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ แต่ในช่วงที่มีปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 3 wt.% ถึง 5 wt.% ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีการดูดซับพลังงานสูงขึ้นอย่างชัดเจน

#### 4.4.2.6 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อ

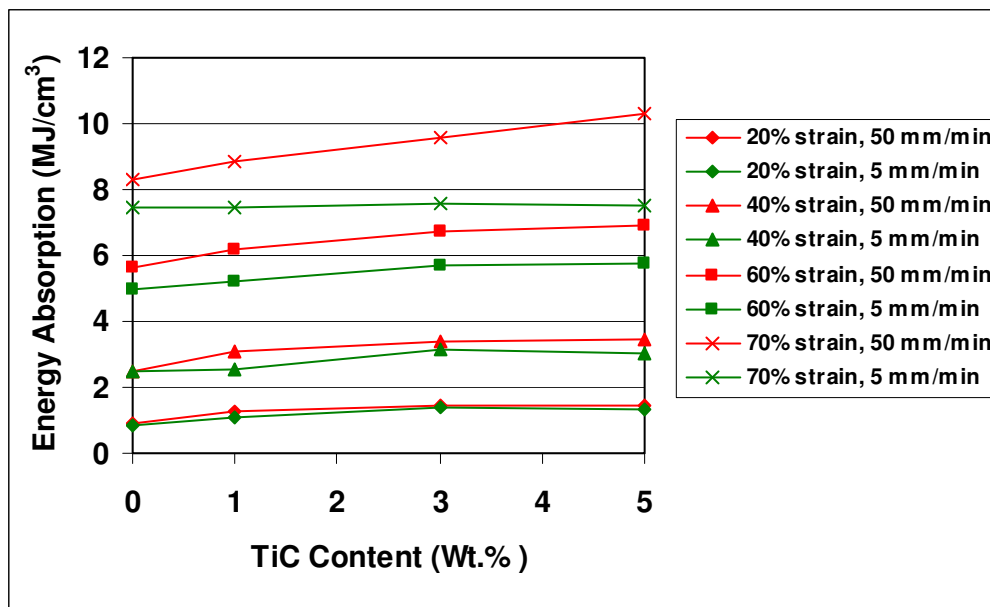


รูปที่ 4.36 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกัน พบว่า ความแตกต่างระหว่างความเร็วหัวกดทั้งสองยังไม่เห็นเด่นชัดที่ 20% ของความเครียด แต่เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นความแตกต่างยิ่งชัดเจนขึ้น โดยที่ 40% ของความเครียดที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานน้อยกว่าที่ความเร็ว 5 mm/min แม้ว่าในช่วงแรกจะมีค่าใกล้เคียงกันก็ตาม ซึ่งต่างจากที่ 60% และ 70% ของความเครียด ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงที่มีปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 0 wt.% ถึง 3 wt.% จากนั้นการดูดซับพลังงานจะสูงขึ้นกว่าในช่วงแรกมากเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อ ส่วนที่ความเร็ว 5 mm/min การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์



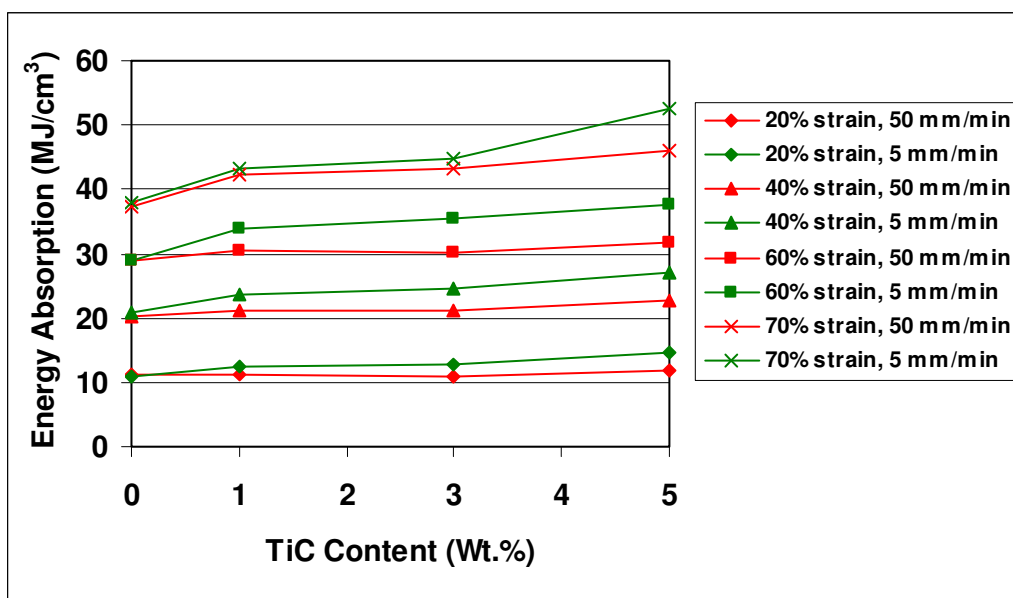
#### 4.4.2.7 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์



รูปที่ 4.37 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ในทุกกรณี และการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นพอสมควรในช่วงที่มีปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ 0 wt.% ถึง 1 wt.% จากนั้นการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนแทบจะคงที่ ยกเว้นที่ 70% ของความเครียดที่การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นจนเกือบจะเป็นเส้นตรง ส่วนที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ทุกระยะของความเครียดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันคือ การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่มีปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ 3 wt.% หลังจากนั้นการดูดซับพลังงานจะลดลงเล็กน้อย แต่ที่ 70% ของความเครียดแม้จะมีแนวโน้มเดียวกันแต่มีค่าการดูดซับพลังงานที่ใกล้เคียงกันมาก

#### 4.4.2.8 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อ

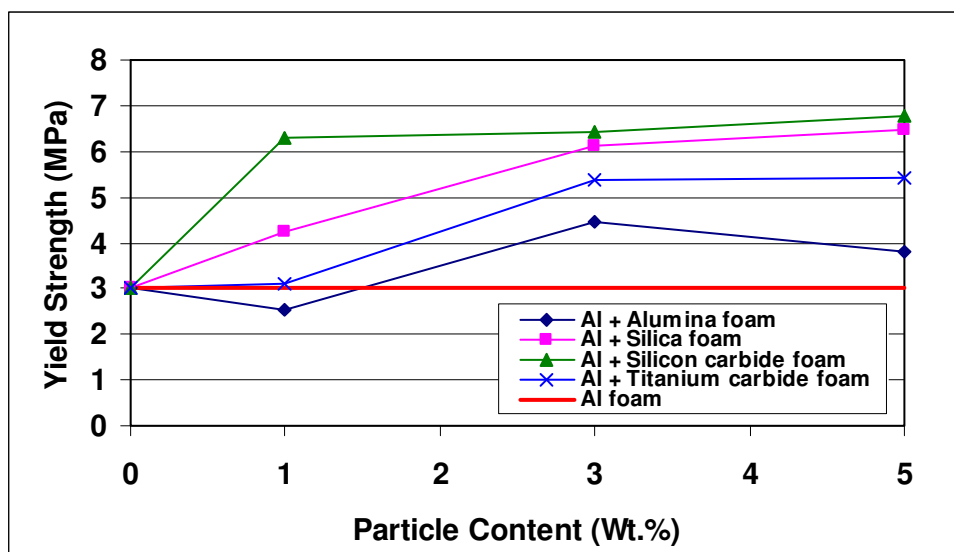


รูปที่ 4.38 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกัน

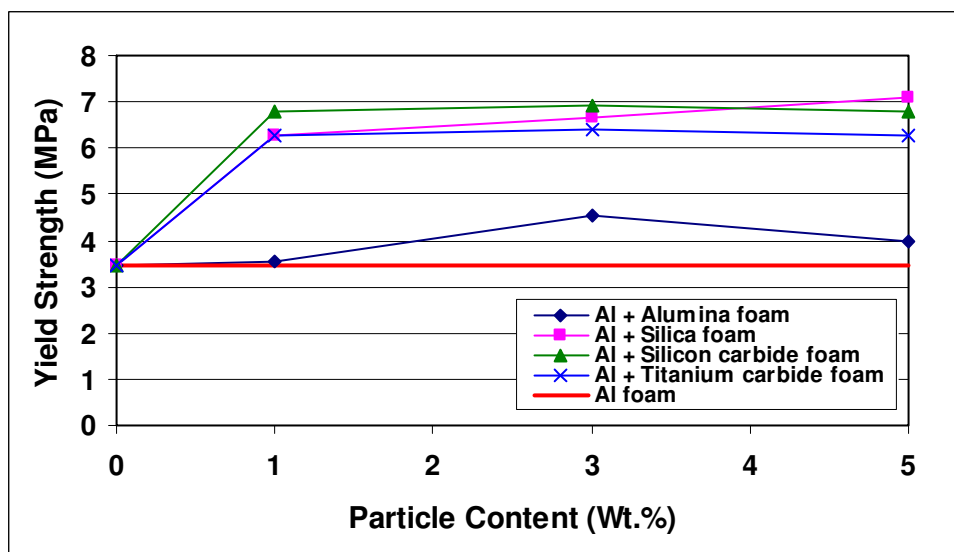
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดหรือการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกัน พบว่า ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min ในทุกกรณี โดยการดูดซับพลังงานจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงที่มีปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ 1 wt.% ถึง 3 wt.% ส่วนที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ 70% ของความเครียดในช่วงที่มีปริมาณไทเทเนียมคาร์ไบด์ 0 wt.% ถึง 1 wt.% จะมีการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นมากหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามปริมาณ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น

#### 4.4.3 ผลจากการเติมอนุภาคเซรามิกต่างๆ

##### 4.4.3.1 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.39 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกัด 5 mm/min

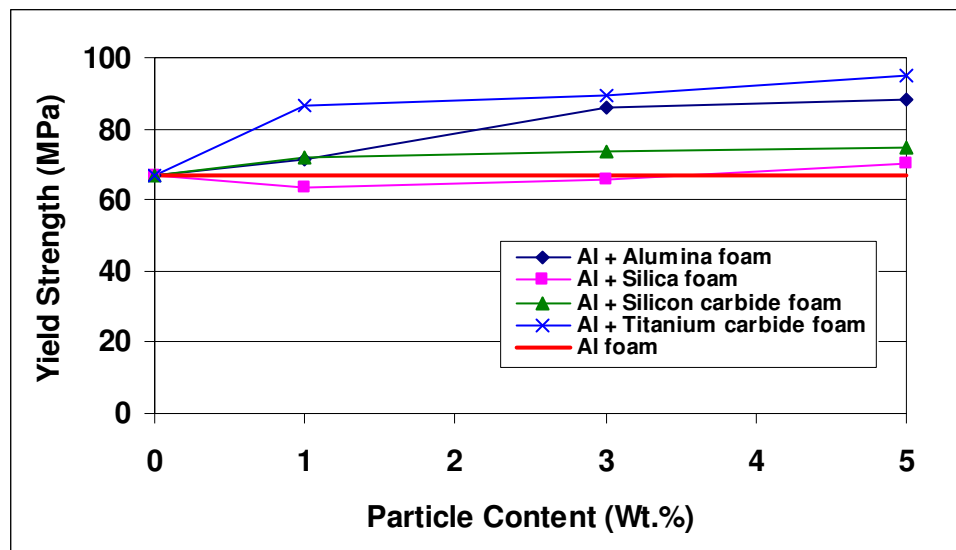


รูปที่ 4.40 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกัด 50 mm/min

จากรูปที่ 4.39 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min พบว่า แนวโน้มของความเค้นจุดครากมากขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคเซรามิกมากขึ้นและมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ยกเว้นเมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาลงไปทำให้ค่าความเค้นจุดครากลดลงต่ำกว่าในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ปริมาณอนุภาคอะลูมินา 1 wt.% จากนั้นสูงขึ้นที่ปริมาณอนุภาคอะลูมินา 3 wt.% และลดต่ำลงอีกที่ปริมาณอะลูมินา 5 wt.% ซึ่งเมื่อเทียบกับการเติมอนุภาคเซรามิกทุกชนิดอะลูมินามีค่าความเค้นจุดครากต่ำที่สุด ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่าความเค้นจุดครากสูงที่สุด

เมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min แนวโน้มและค่าความเค้นจุดครากมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นดังรูปที่ 4.40 ยกเว้นเมื่อเติมอนุภาคอะลูมินามีแนวโน้มและความเค้นจุดครากใกล้เคียงกับความเร็วหัวกด 5 mm/min แต่ต่างกันตรงที่เมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาปริมาณ 1% ความเค้นจุดครากยังมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยที่ความเร็วหัวกดนี้เมื่อเติมซิลิกอนคาร์ไบด์จะทำให้มีค่าความเค้นจุดครากมากที่สุด ยกเว้นที่ปริมาณ 5 wt.% ซิลิกาจะมีค่ามากที่สุด ส่วนในกรณีของอนุภาคอะลูมินายังคงมีค่าความเค้นจุดครากน้อยที่สุดเช่นเดิม

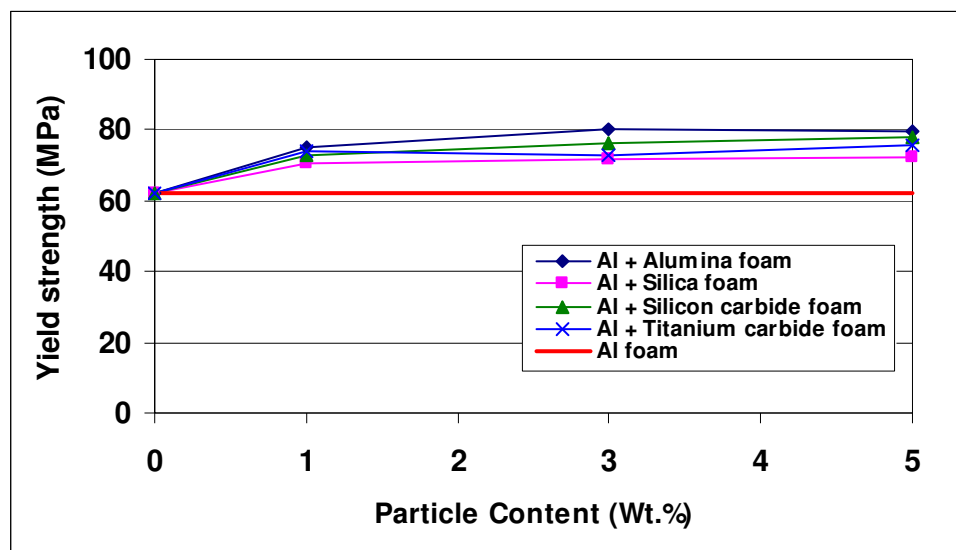
#### 4.4.3.2 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.41 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

รูปที่ 4.41 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min พบว่า แนวโน้มโดยรวมแม้ค่าความเค้นจุดครากจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเซรามิกแต่ลักษณะของกราฟแตกต่างกัน โดยเมื่อเติมอนุภาคซิลิกาลงไปเป็นปริมาณ 1 wt.% และ 3 wt.% ความเค้นจะต่ำกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อ และเมื่อเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์และซิลิกอนคาร์ไบด์พบว่าความเค้นจุดครากเพิ่มสูงขึ้นที่ปริมาณ 1 wt.% และหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การเติมอนุภาคอะลูมินาจะทำให้ความเค้นจุดครากสูงขึ้นมากจนถึงปริมาณ 3 wt.% หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งที่ความเร็วหัวกดนี้การเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทำให้มีค่าความเค้นจุดครากสูงที่สุด

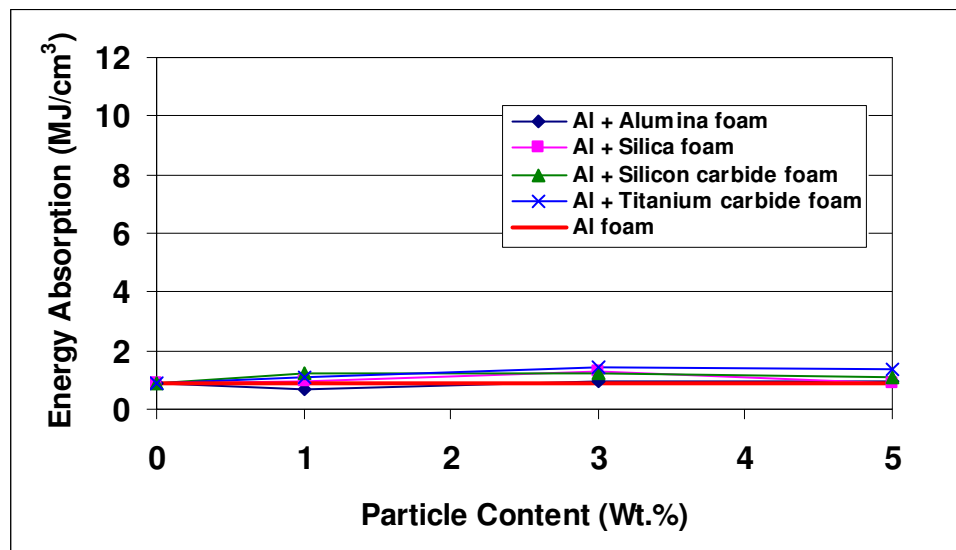
เมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดขึ้นเป็น 50 mm/min ค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มเดียวกันและมีค่าสูงกว่าของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อทั้งหมด คือ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเติมอนุภาคเซรามิกปริมาณ 1 wt.% หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเกือบมีค่าคงที่ ซึ่งในที่นี้การเติมอนุภาคอะลูมินากลับทำให้มีค่าความเค้นจุดครากสูงที่สุด ดังรูปที่ 4.42



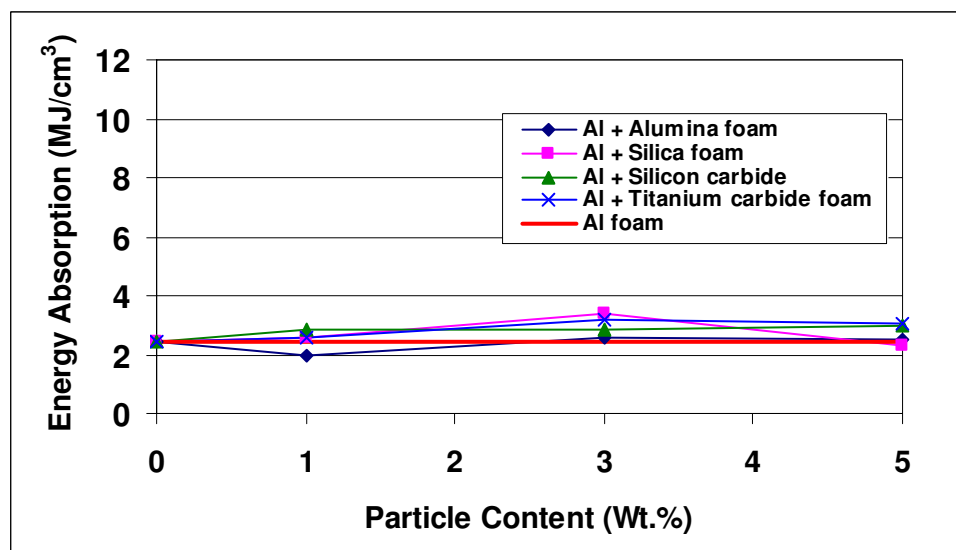
รูปที่ 4.42 ความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

#### 4.4.3.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมที่ความเร็วหัวกด

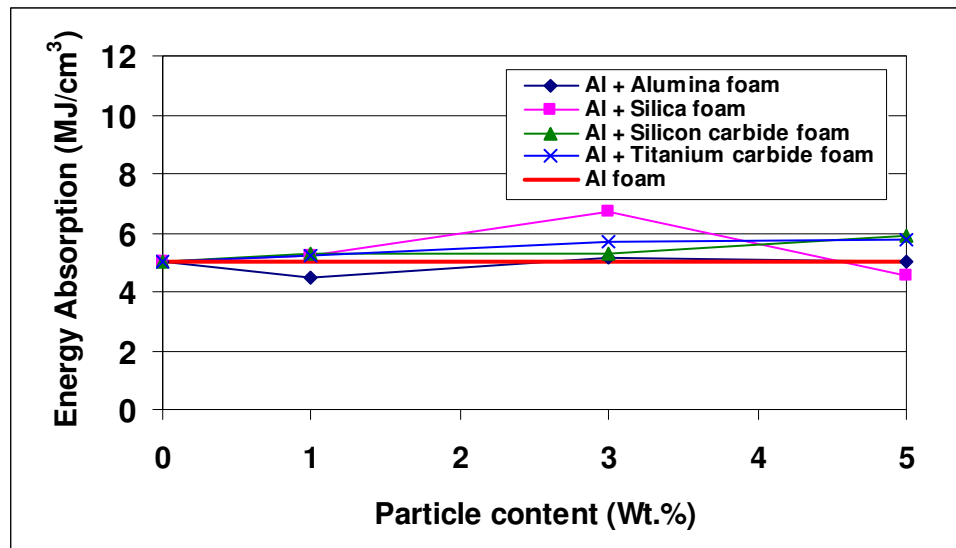
5 mm/min



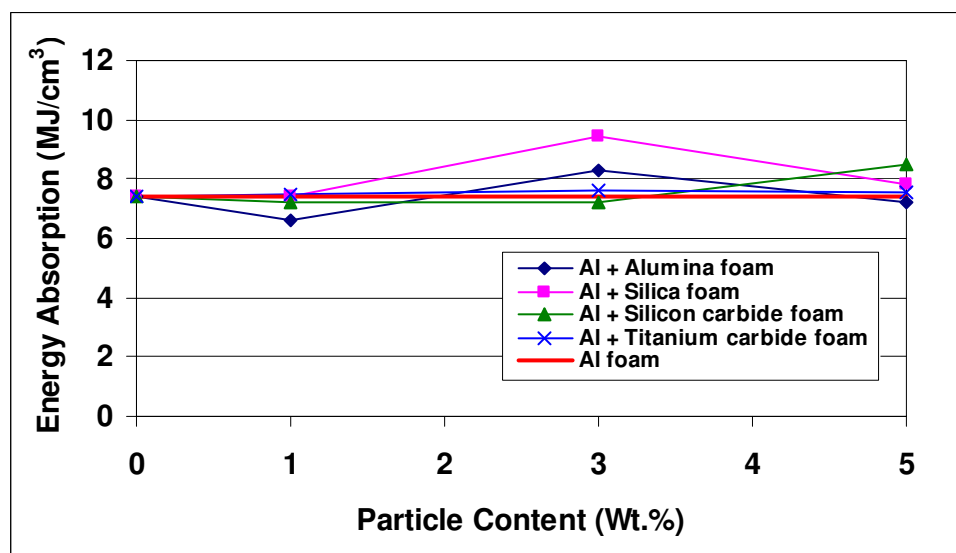
รูปที่ 4.43 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min



รูปที่ 4.44 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 40% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min



รูปที่ 4.45 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 60% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min



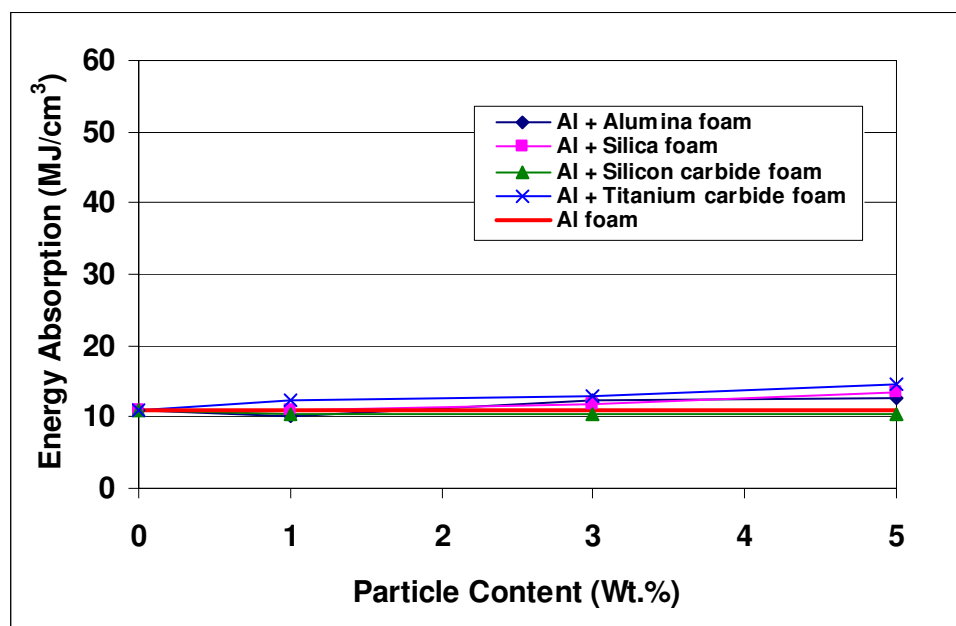
รูปที่ 4.46 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

จากรูปที่ 4.43 ถึงรูปที่ 4.46 แสดงการดูดซับพลังงานจากแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียด ตามลำดับ ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min แสดงให้เห็นว่าที่ 20% ของความเครียดมีการดูดซับพลังงานที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งหมด ซึ่งจะเริ่มเห็นความแตกต่างมากขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มมากขึ้น เช่นที่ 40% และ 60% ของความเครียด พบว่า มีเพียงการเติมอนุภาคอะลูมินาปริมาณ 1 wt.% และการเติมอนุภาคซิลิกาปริมาณ 5 wt.% เท่านั้นที่ทำให้การดูดซับพลังงานต่ำกว่าการดูดซับพลังงานของโฟม

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ อีกทั้งการเติมอนุภาคทุกชนิดจะมีการดูดซับพลังงานสูงสุดอยู่ที่ปริมาณ 3 wt.% ยกเว้นการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่สามารถดูดซับพลังงานได้สูงสุดที่ปริมาณ 5 wt.% ส่วนที่ 70% ของความเครียด มีแนวโน้มการดูดซับพลังงานเหมือนที่ระยะความเครียดอื่นๆ เพียงแต่การเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 1 wt.% และ 3 wt.% และการเติมอนุภาคอะลูมินาที่ 5 wt.% ทำให้มีการดูดซับพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

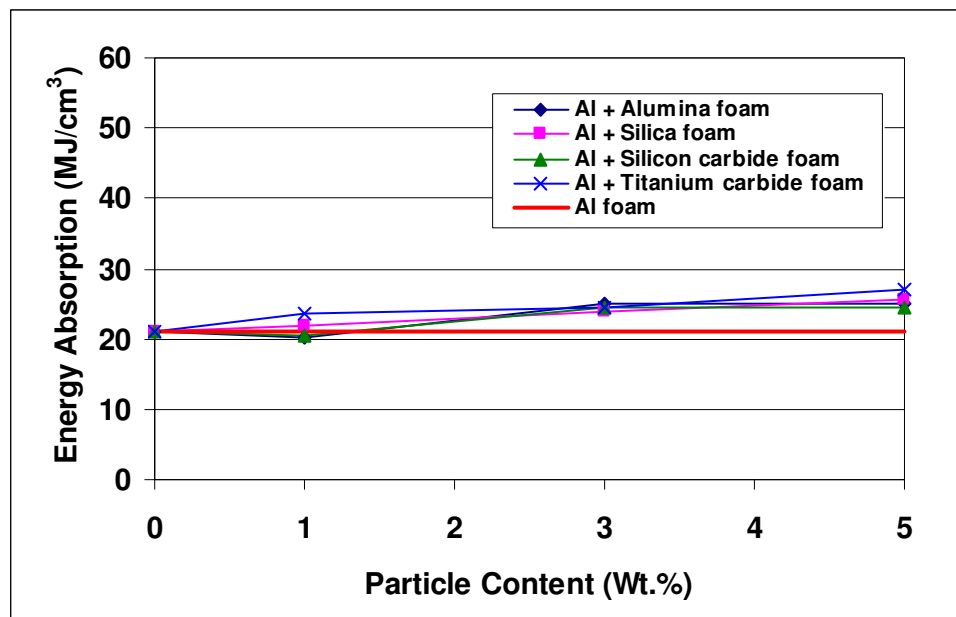
#### 4.4.3.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมในท่อที่ความเร็ว

หัวกด 5 mm/min

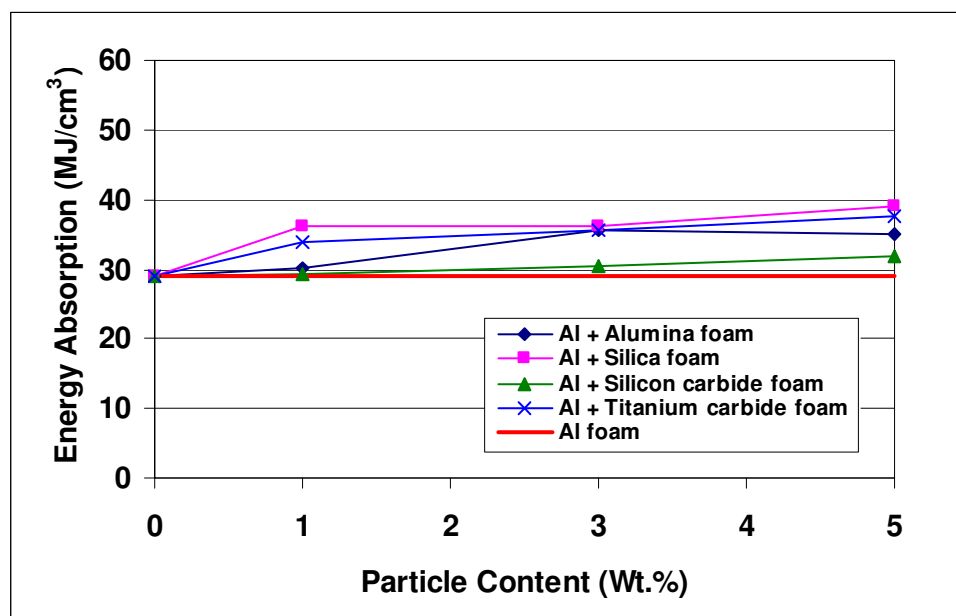


รูปที่ 4.47 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min

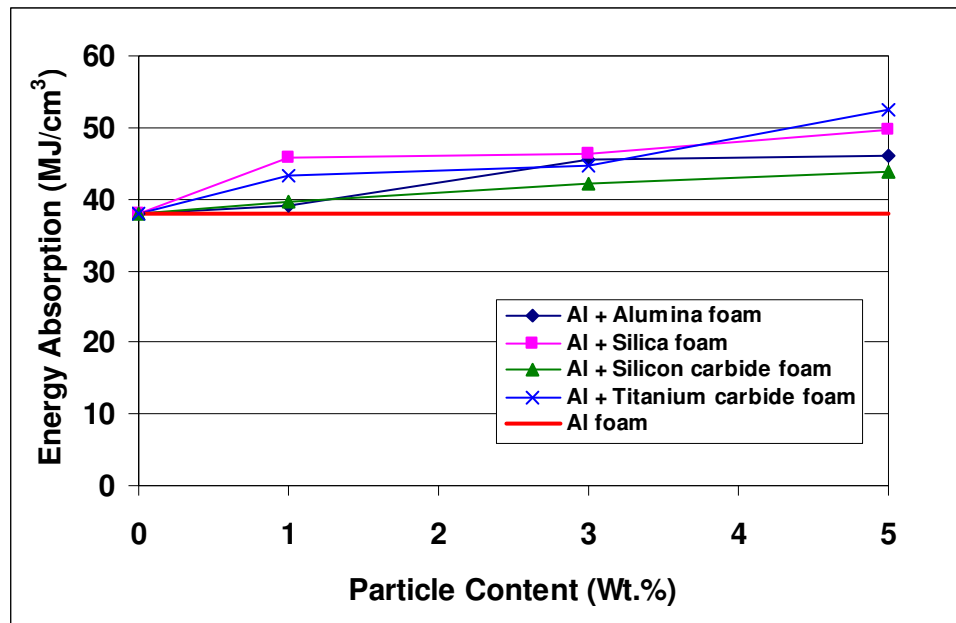




รูปที่ 4.48 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 40% ความเคี้ยวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อใน ปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min



รูปที่ 4.49 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 60% ความเคี้ยวของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อใน ปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min

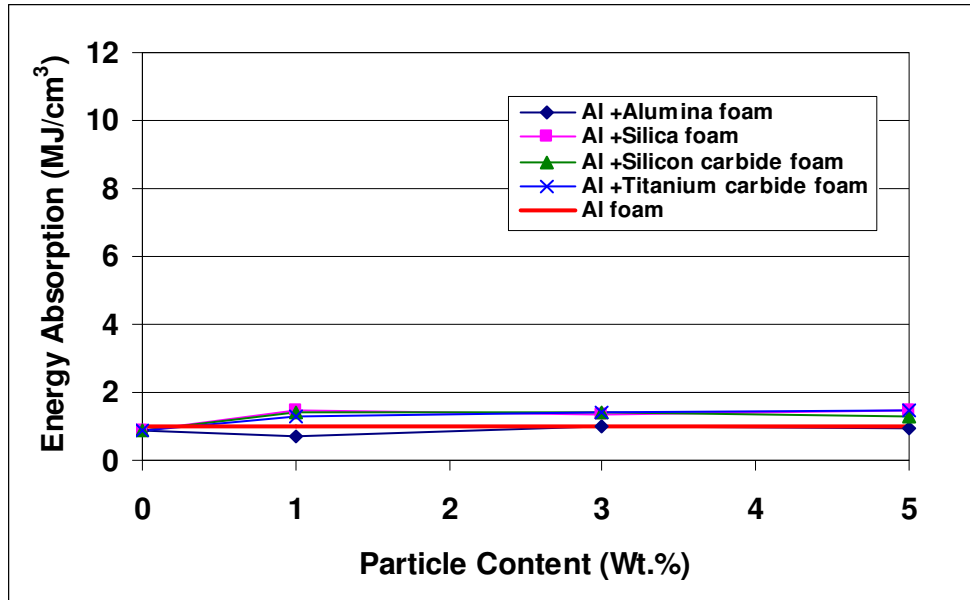


รูปที่ 4.50 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min

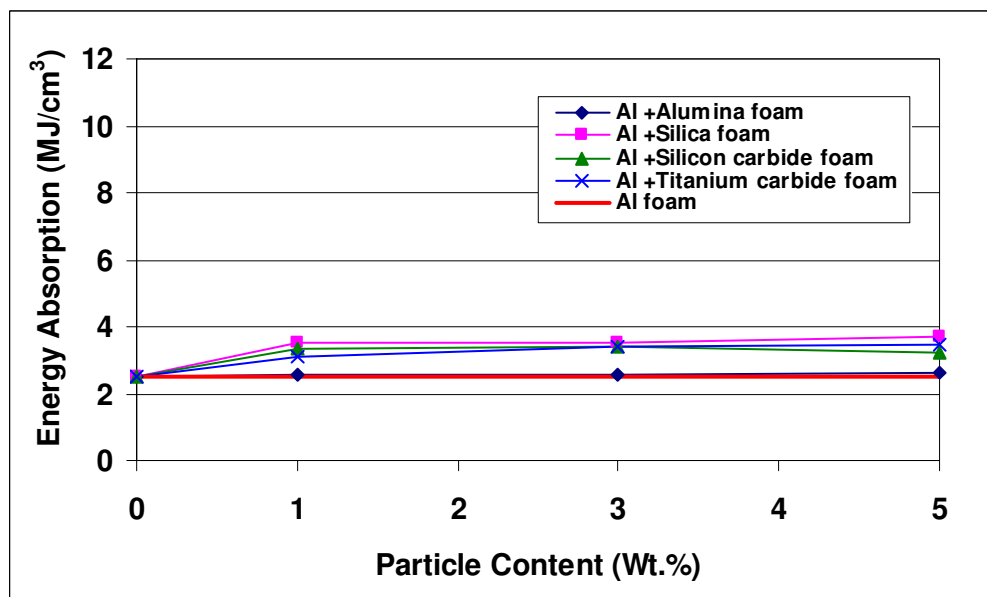
จากรูปที่ 4.47 ถึง รูปที่ 4.50 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดตามลำดับ ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 5 mm/min พบว่าในทุกกรณีมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงกว่ากรณีของ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อ โดยที่ 20% และ 40% ของความเครียด การดูดซับพลังงานมีแนวโน้ม สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเซรามิก อย่างไรก็ตามยังไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน แต่เมื่อมี ความเครียดเพิ่มขึ้นพบว่าที่ 60% ของความเครียด มีการดูดซับพลังงานมากที่สุดที่ปริมาณเซรามิก 5 wt.% ซึ่งการดูดซับพลังงานสูงขึ้นเล็กน้อยจากปริมาณเซรามิก 1 wt.% ถึง 3 wt.% ยกเว้นการเติม อนุภาคอะลูมินาที่มีการดูดซับพลังงานสูงขึ้นมากในช่วงนี้ แต่หลังจากนั้นการดูดซับพลังงานจะ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนที่ 70% ของความเครียด มีแนวโน้มเดียวกับที่ 60% ของความเครียด ต่างกัน ตรงที่มีการดูดซับพลังงานสูงสุดเมื่อเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ 5 wt.% แทนที่จะเป็นซิลิกา เหมือนที่ 60% ของความเครียด ซึ่งการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถเพิ่มการดูดซับพลังงาน ได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมเซรามิกชนิดอื่นๆ

#### 4.4.3.5 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมที่ความเร็วหัวกด

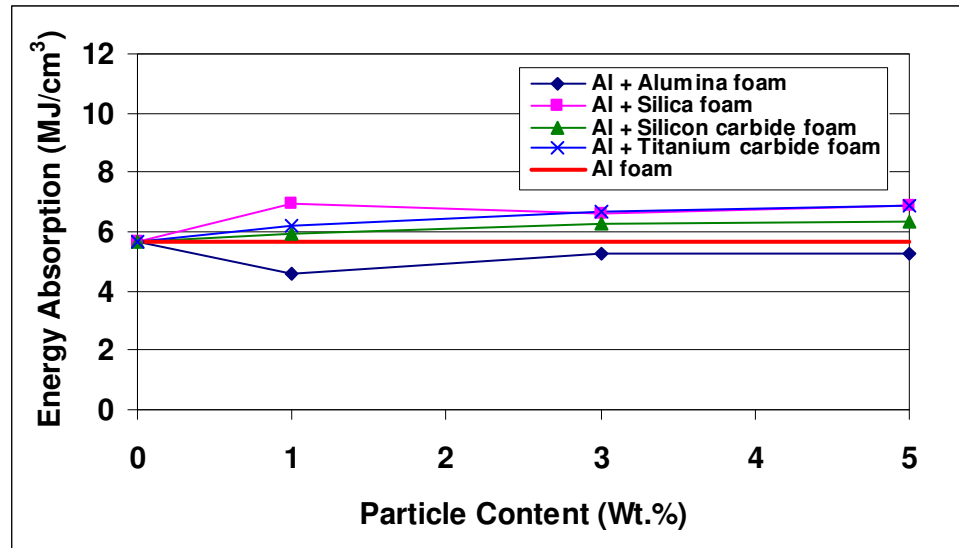
50 mm/min



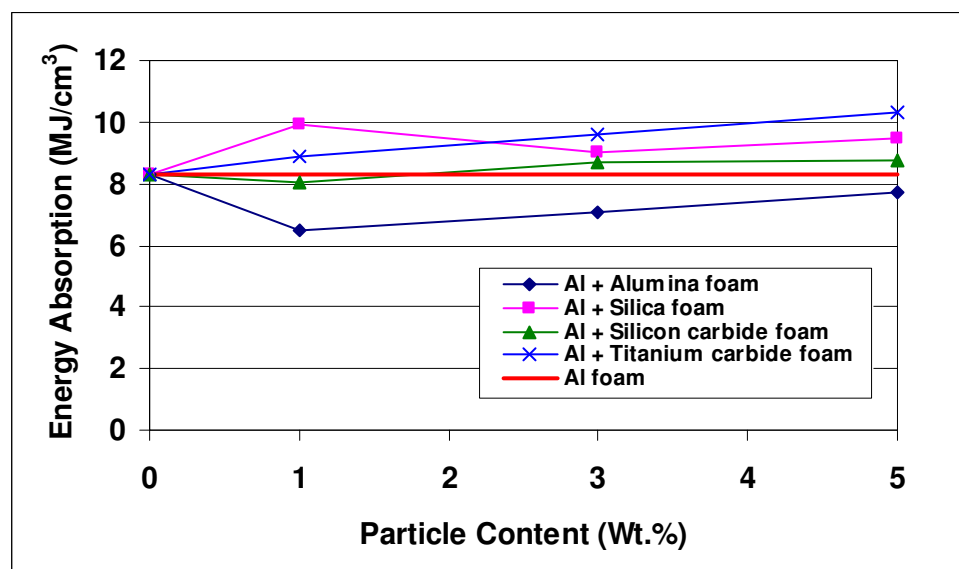
รูปที่ 4.51 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min



รูปที่ 4.52 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 40% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min



รูปที่ 4.53 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 60% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min



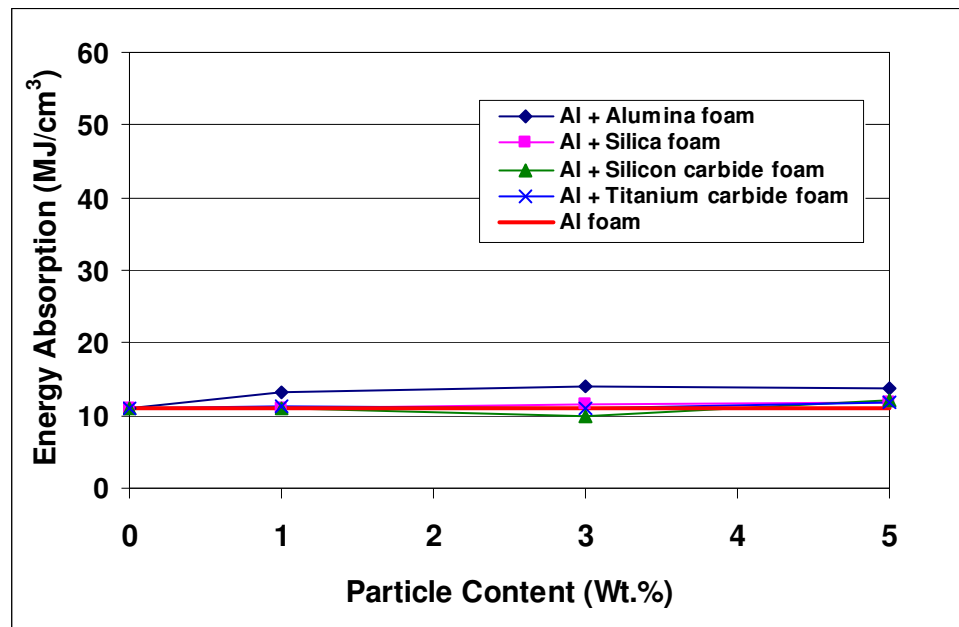
รูปที่ 4.54 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min

จากรูปที่ 4.51 ถึง รูปที่ 4.54 แสดงการดูดซับพลังงานจากแรงอัดที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดตามลำดับ ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในปริมาณต่างๆเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min พบว่าที่ 20% และ 40% ของความเครียดการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเซรามิกเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่เห็นความแตกต่างชัดเจนนัก ซึ่งที่ 60% และ 70% ของความเครียดจะมีความชัดเจนมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติมอนุภาคอะลูมินากลับทำให้การดูดซับพลังงานลดลงต่ำกว่าในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และแนวโน้มของการดูดซับ

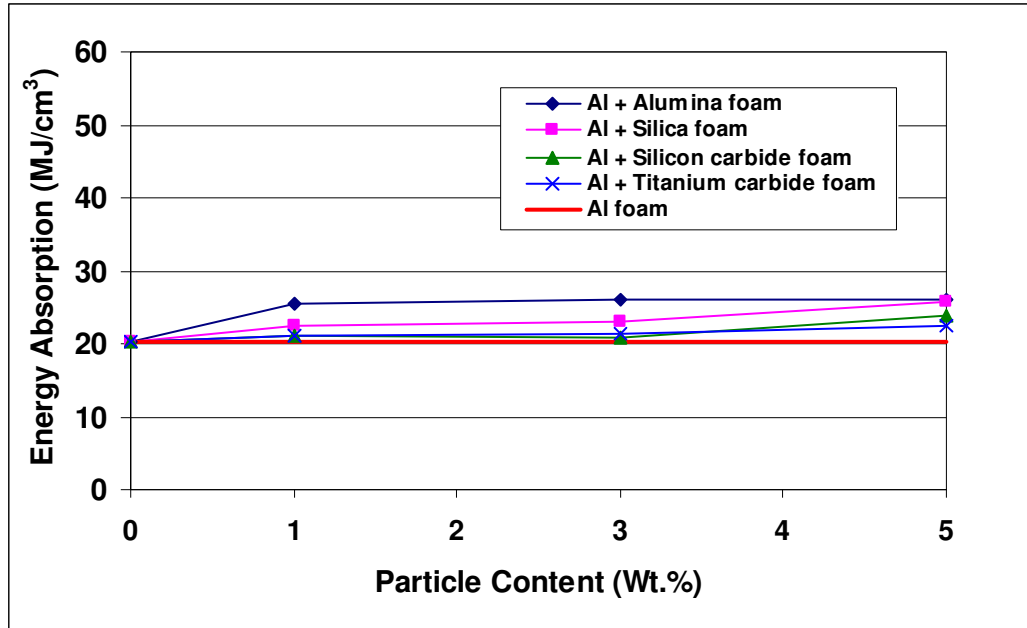
พลังงานเมื่อเติมเซรามิกชนิดอื่น ๆ ก็แตกต่างกันออกไป เช่นการเติมอนุภาคซิลิกาซึ่งมีการดูดซับพลังงานมากที่สุดเมื่อมีปริมาณซิลิกา 1 wt.% จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ปริมาณ 5 wt.% และยังต่างจากการเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อเพิ่มปริมาณเซรามิก ซึ่งเมื่อเทียบกับเซรามิกชนิดอื่นๆแล้วพบว่าไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีปริมาณ 5 wt.% มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงที่สุด

#### 4.4.3.6 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมในท่อที่ความเร็ว

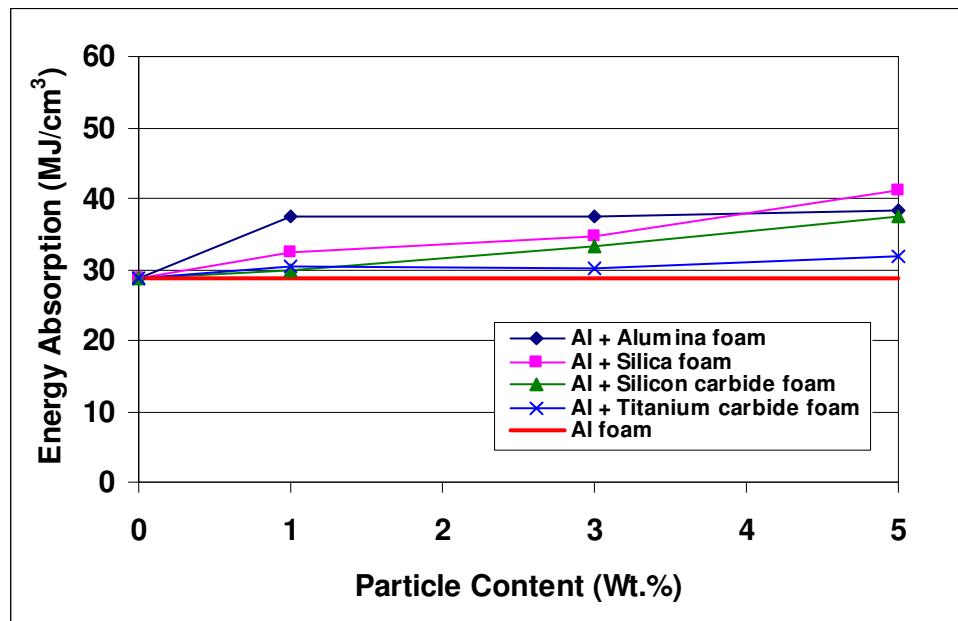
หัวกด 50 mm/min



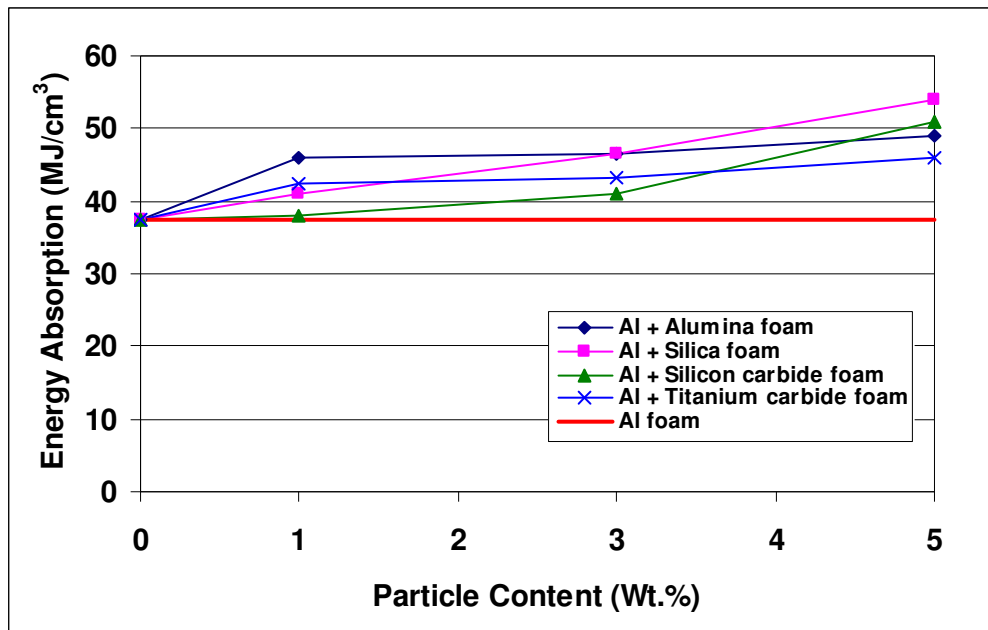
รูปที่ 4.55 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 20% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min



รูปที่ 4.56 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 40% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อใน ปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min



รูปที่ 4.57 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 60% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อใน ปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min

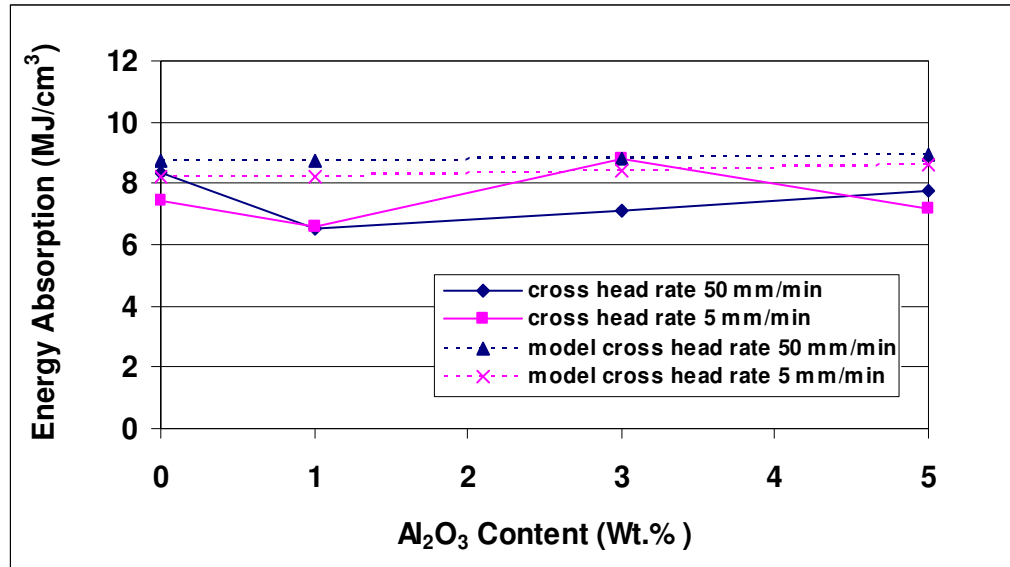


รูปที่ 4.58 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ ความเร็วหัวกด 50 mm/min

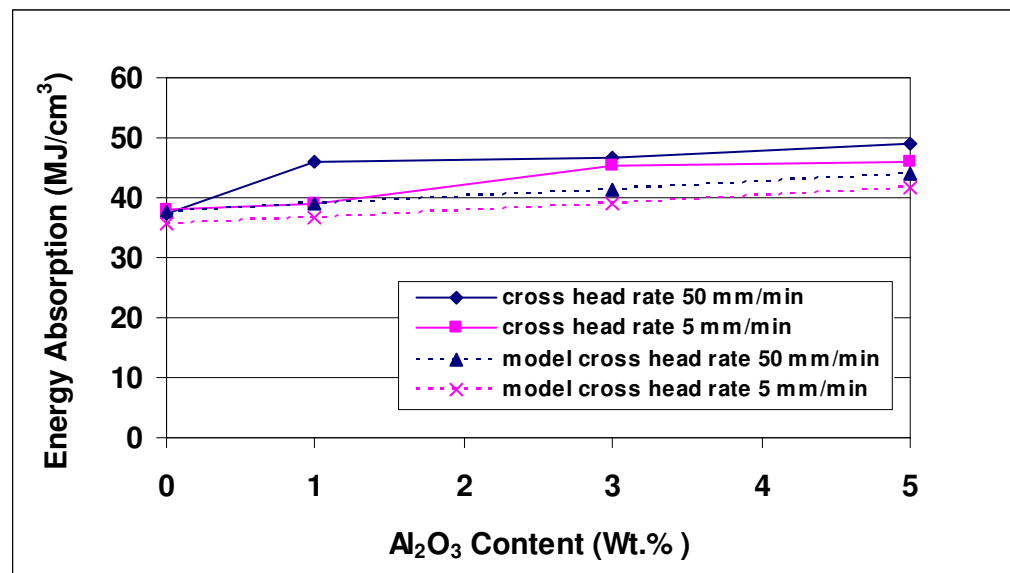
เมื่อนำโฟมอะลูมิเนียมที่เสริมอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆมาใส่ในท่อความสามารถในการดูดซับพลังงานของเซรามิกทุกชนิดจะมีมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในท่อ ดังรูปที่ 4.55 ถึง รูปที่ 4.58 ซึ่งเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ 20% 40% 60% และ 70% ของความเครียดตามลำดับ ของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อในปริมาณต่างๆที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min พบว่า ที่ 20% และ 40% ของความเครียด มีแนวโน้มเดียวกันคือ การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเติมอนุภาคปริมาณ 1 wt.% จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แต่เฉพาะการเติมอนุภาคอะลูมินาลงไปเท่านั้นที่ทำให้การดูดซับพลังงานมีค่ามากกว่าการเติมอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นอย่างชัดเจน ส่วนที่ 60% และ 70% ของความเครียด จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับพลังงานจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณเซรามิกเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงที่มีปริมาณเซรามิก 1 wt.% ถึง 3 wt.% การเติมอนุภาคอะลูมินาจะทำให้มีการดูดซับพลังงานได้สูงที่สุด แต่ในช่วงที่มีปริมาณเซรามิก 3 wt.% ถึง 5 wt.% กลับเป็นการเติมอนุภาคซิลิกาที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงที่สุด

#### 4.5 การเปรียบเทียบค่าจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลอง

##### 4.5.1 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินา



รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ปริมาณต่างกับกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อที่ปริมาณต่างกับกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง



ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

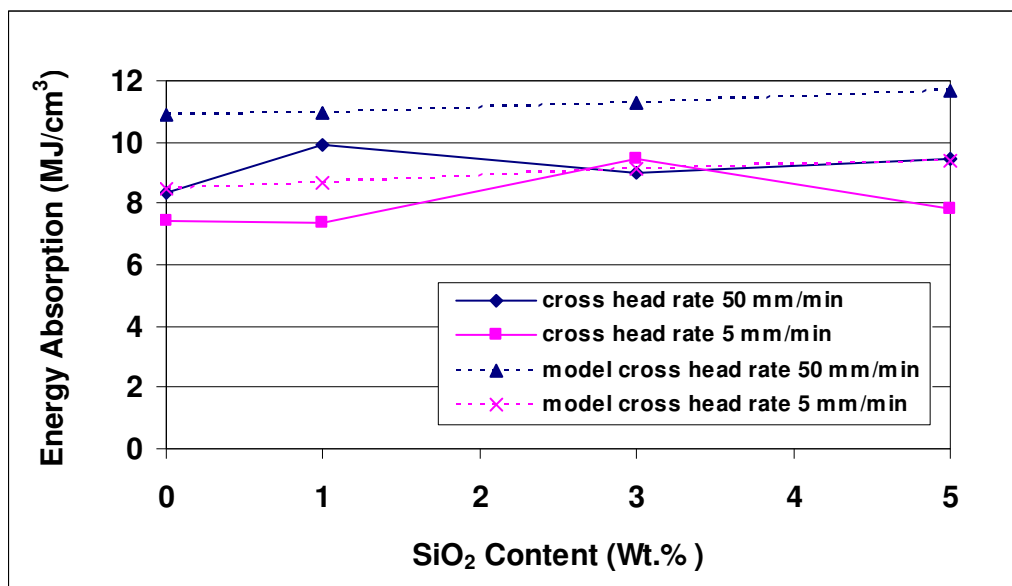
ชิ้นงาน	$E.A._{70\%}$ (MPa)	$E.A._{foam+tube}$ (MPa)	$E.A._{int}$ (MPa)	$E.A._{calculated\ 70\%}$ (MPa)	$E.A._{error}$ (%)
Al foam	7	-	-	8	10
Al + 1 wt.% $Al_2O_3$ foam	7	-	-	8	25
Al + 3 wt.% $Al_2O_3$ foam	9	-	-	8	-4
Al + 5 wt.% $Al_2O_3$ foam	7	-	-	9	20
Al foam filled-tube	38	35	3	36	-6
Al + 1 wt.% $Al_2O_3$ foam filled-tube	39	34	5	37	-6
Al + 3 wt.% $Al_2O_3$ foam filled-tube	45	36	9	39	-14
Al + 5 wt.% $Al_2O_3$ foam filled-tube	46	35	11	42	-10

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

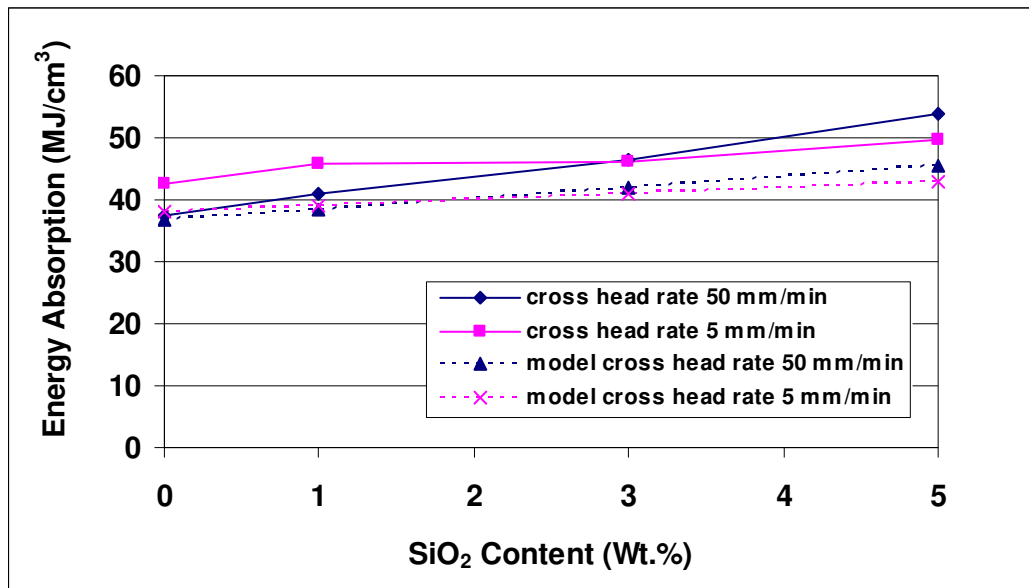
ชิ้นงาน	$E.A._{70\%}$ (MPa)	$E.A._{foam+tube}$ (MPa)	$E.A._{int}$ (MPa)	$E.A._{calculated\ 70\%}$ (MPa)	$E.A._{error}$ (%)
Al foam	8	-	-	9	5
Al + 1 wt.% $Al_2O_3$ foam	6	-	-	9	35
Al + 3 wt.% $Al_2O_3$ foam	7	-	-	9	24
Al + 5 wt.% $Al_2O_3$ foam	8	-	-	9	15
Al foam filled-tube	37	36	1	38	1
Al + 1 wt.% $Al_2O_3$ foam filled-tube	46	34	12	39	-15
Al + 3 wt.% $Al_2O_3$ foam filled-tube	47	35	12	41	-11
Al + 5 wt.% $Al_2O_3$ foam filled-tube	49	35	14	44	-10

จากรูปที่ 4.59 กับ 4.60 และ ตารางที่ 4.3 กับ 4.4 แสดงให้เห็นว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ไม่ใส่ท่อจะมีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง ส่วนในกรณีที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาใส่ท่อค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงมากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง โดยที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาไม่ใส่ท่อมีค่าถึง 35% สำหรับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาใส่ท่อมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 15%

#### 4.5.2 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา



รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ปริมาณต่างกับกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 4.62 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาในท่อที่ปริมาณต่างกักับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

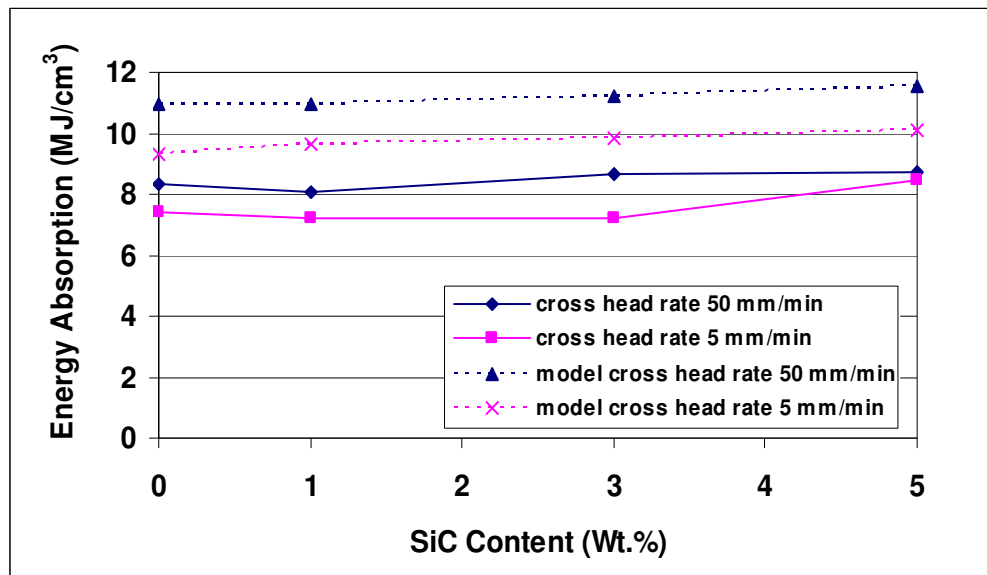
ชิ้นงาน	E.A. <sub>70%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>calculated 70%</sub> (MPa)	E.A. <sub>error</sub> (%)
Al foam	7	-	-	8	14
Al + 1 wt.% SiO <sub>2</sub> foam	7	-	-	9	18
Al + 3 wt.% SiO <sub>2</sub> foam	9	-	-	9	-4
Al + 5 wt.% SiO <sub>2</sub> foam	8	-	-	9	20
Al foam filled-tube	43	35	8	38	-11
Al + 1 wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	46	35	11	39	-15
Al + 3 wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	46	37	9	41	-11
Al + 5 wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	50	35	14	43	-13

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

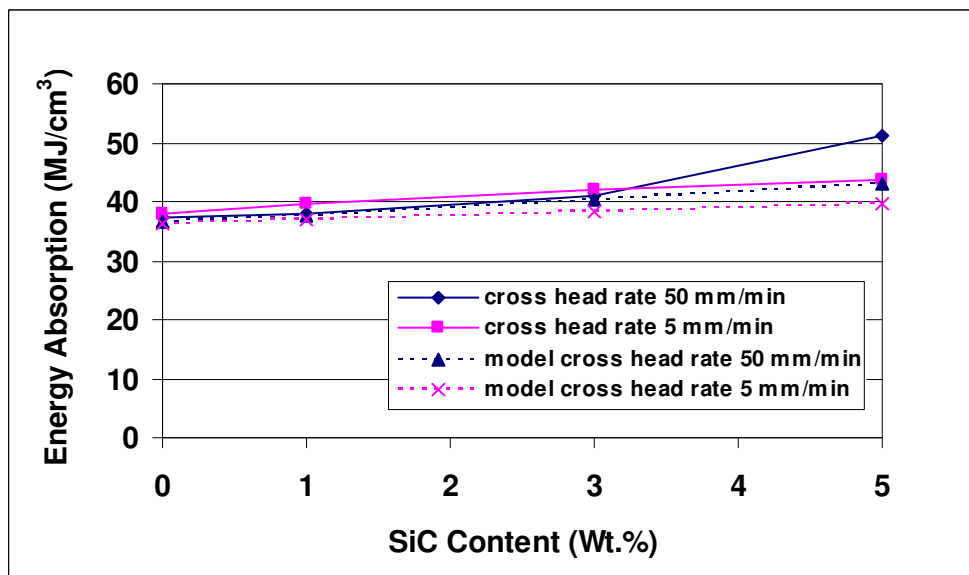
ชิ้นงาน	$E.A._{70\%}$ (MPa)	$E.A._{foam+tube}$ (MPa)	$E.A._{int}$ (MPa)	$E.A._{calculated\ 70\%}$ (MPa)	$E.A._{error}$ (%)
Al foam	8	-	-	11	31
Al + 1 wt.% SiO <sub>2</sub> foam	10	-	-	11	10
Al + 3 wt.% SiO <sub>2</sub> foam	9	-	-	11	26
Al + 5 wt.% SiO <sub>2</sub> foam	9	-	-	12	23
Al foam filled-tube	37	36	1	37	-1
Al + 1 wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	41	38	3	39	-6
Al + 3 wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	47	37	10	42	-10
Al + 5 wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	54	37	17	45	-16

จากรูปที่ 4.61 กับ 4.62 และ ตารางที่ 4.5 กับ 4.6 แสดงให้เห็นว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ไม่ใส่ท่อจะมีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง ส่วนในกรณีที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาใส่ท่อค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงมากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง โดยที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาไม่ใส่ท่อมีค่าถึง 31% สำหรับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาใส่ท่อมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 16%

### 4.5.3 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4.63 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ปริมาณต่างกัันกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 4.64 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในท่อที่ปริมาณต่างกัันกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

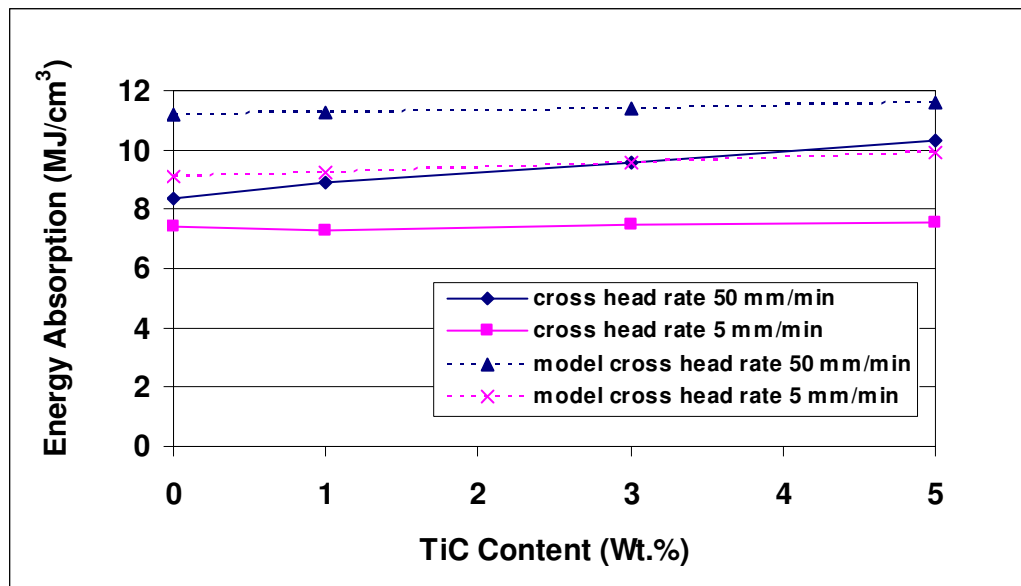
ชิ้นงาน	$E.A._{70\%}$ (MPa)	$E.A._{foam+tube}$ (MPa)	$E.A._{int}$ (MPa)	$E.A._{calculated\ 70\%}$ (MPa)	$E.A._{error}$ (%)
Al foam	7	-	-	9	25
Al + 1 wt.% SiC foam	7	-	-	10	33
Al + 3 wt.% SiC foam	7	-	-	10	36
Al + 5 wt.% SiC foam	8	-	-	10	19
Al foam filled-tube	38	35	3	36	-5
Al + 1 wt.% SiC foam filled-tube	40	35	5	37	-6
Al + 3 wt.% SiC foam filled-tube	42	35	7	38	-9
Al + 5 wt.% SiC foam filled-tube	44	36	8	40	-10

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

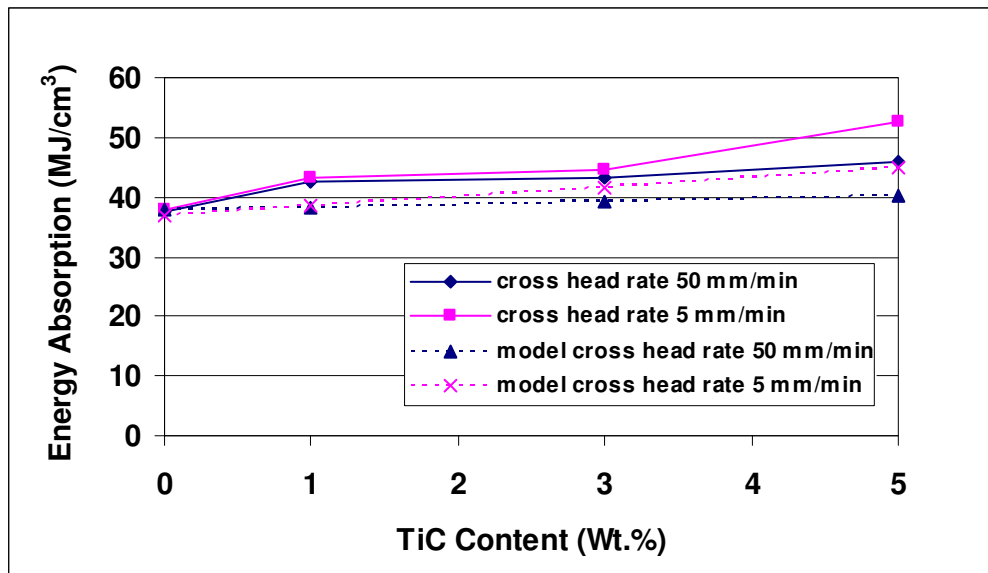
ชิ้นงาน	$E.A._{70\%}$ (MPa)	$E.A._{foam+tube}$ (MPa)	$E.A._{int}$ (MPa)	$E.A._{calculated\ 70\%}$ (MPa)	$E.A._{error}$ (%)
Al foam	8	-	-	11	32
Al + 1 wt.% SiC foam	8	-	-	11	36
Al + 3 wt.% SiC foam	9	-	-	11	29
Al + 5 wt.% SiC foam	9	-	-	12	32
Al foam filled-tube	37	36	1	37	-2
Al + 1 wt.% SiC foam filled-tube	38	36	2	38	-1
Al + 3 wt.% SiC foam filled-tube	41	36	5	40	-2
Al + 5 wt.% SiC foam filled-tube	51	36	15	43	-16

จากรูปที่ 4.63 กับ 4.64 และ ตารางที่ 4.7 กับ 4.8 แสดงให้เห็นว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ไม่ใส่ท่อจะมีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง ส่วนในกรณีที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ใส่ท่อค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงมากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองซึ่งค่าที่ได้ยังใกล้เคียงกันอย่างมากอีกด้วย โดยที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองไม่ต่างจากที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่ใส่ท่อมีค่าถึง 36% สำหรับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ใส่ท่อมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 16%

#### 4.5.4 โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์



รูปที่ 4.65 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างกับกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ 70% ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในท่อที่ปริมาณต่างกันกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

ชิ้นงาน	E.A. <sub>70%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>calculated 70%</sub> (MPa)	E.A. <sub>error</sub> (%)
Al foam	7	-	-	9	22
Al + 1 wt.% TiC foam	7	-	-	9	26
Al + 3 wt.% TiC foam	7	-	-	10	28
Al + 5 wt.% TiC foam	8	-	-	10	31
Al foam filled-tube	38	35	3	37	-3
Al + 1 wt.% TiC foam filled-tube	43	35	8	39	-11
Al + 3 wt.% TiC foam filled-tube	45	35	10	42	-7
Al + 5 wt.% TiC foam filled-tube	55	35	19	47	-17



ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

ชิ้นงาน	$E.A._{70\%}$ (MPa)	$E.A._{foam+tube}$ (MPa)	$E.A._{int}$ (MPa)	$E.A._{calculated\ 70\%}$ (MPa)	$E.A._{error}$ (%)
Al foam	8	-	-	11	34
Al + 1 wt.% TiC foam	9	-	-	11	27
Al + 3 wt.% TiC foam	10	-	-	11	19
Al + 5 wt.% TiC foam	10	-	-	12	13
Al foam filled-tube	37	36	1	38	1
Al + 1 wt.% TiC foam filled-tube	42	36	6	38	-10
Al + 3 wt.% TiC foam filled-tube	43	37	6	39	-9
Al + 5 wt.% TiC foam filled-tube	46	38	8	40	-12

จากรูปที่ 4.65 กับ 4.66 และ ตารางที่ 4.9 กับ 4.10 แสดงให้เห็นว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ไม่ใส่ท่อจะมีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง ส่วนในกรณีที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงมากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง โดยที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองไม่ต่างจากที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ไม่ใส่ท่อมีค่าถึง 34% สำหรับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 12%

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลของอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงาน

##### 5.1.1 ในกรณีที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกไม่ใส่ท่อ

เนื่องจากผลการทดลองในการทำวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมอนุภาคเซรามิกลงในโฟมอะลูมิเนียมซึ่งแสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกันดังนั้นจึงสามารถนำผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานมาพิจารณาเปรียบเทียบกันได้โดยแยกพิจารณาเป็นอนุภาคแต่ละชนิดได้ดังนี้

- เมื่อผสมอนุภาคอะลูมินาลงในโฟมอะลูมิเนียมจะพบว่ามีความแข็งแรงอัดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยสาเหตุที่เป็นไปได้เนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคอะลูมินาซึ่งทำให้มีอากาศเก็บกักอยู่ในมากกว่าอนุภาคที่ไม่เกาะกลุ่มกัน เพราะอนุภาคเวลาที่เกาะกลุ่มกันจะเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคยังมีอนุภาคจำนวนมากเกาะกลุ่มกันจะยังเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้นรวมทั้งปริมาณอนุภาคที่มากขึ้นยังปิดทางออกของอากาศทำให้อากาศไม่สามารถไหลออกมาจากกลุ่มของอนุภาคได้ง่าย [51] จึงเห็นได้ว่าอนุภาคอะลูมินาโดยส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิวของผนังโพรงอากาศ [52] ดังรูปที่ 4.11 นอกจากการเกาะกลุ่มกันซึ่งจะแสดงพฤติกรรมเหมือนอนุภาคขนาดใหญ่แล้ว มุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างอะลูมิเนียมเหลวและอนุภาคอะลูมินายังมีค่าค่อนข้างมากที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  โดยมีค่าประมาณ  $127^{\circ}$  [53] ซึ่งความสามารถในการเปียกที่ไม่ค่อยดีนี้น่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อนุภาคอะลูมินาถูกอะลูมิเนียมเหลวผลักไปอยู่บริเวณผิวของผนังโพรงอากาศแม้ว่าอนุภาคอะลูมินาจะมีความหนาแน่นประมาณ  $3.96 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งมากกว่าอะลูมิเนียมเหลวที่มีความหนาแน่นประมาณ  $2.69 \text{ g/cm}^3$  ก็ไม่สามารถช่วยให้อนุภาคอะลูมินาจมลงในเนื้ออะลูมิเนียมเหลวได้ อนุภาคจึงไม่ได้ช่วยขัดขวางการไหลของอะลูมิเนียมเหลวดังนั้นความหนืดของโฟมอะลูมิเนียมเหลวจึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งทำให้การไหลของอะลูมิเนียมเหลวยังคงเกิดขึ้นได้ง่ายเหมือนเดิม ทั้งนี้ขณะที่รับแรงอัดเนื่องจากการเปียกที่ไม่ค่อยดีของอนุภาคอะลูมินาซึ่งบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคอะลูมินากับอะลูมิเนียมเนื้อพื้นไม่แข็งแรงทำให้การส่งผ่านแรงอัดจากเนื้อพื้นไปยังอนุภาคทำได้ยากประกอบกับอนุภาคอะลูมินาส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิวของผนังโพรงอากาศทำให้การกระจายแรงอัดทำได้ไม่ทั่วถึง จึงอาจกล่าวได้ว่าอนุภาคอะลูมินาแทบจะไม่ได้ช่วยในการรับแรงอัดและดูดซับพลังงานเลย อีกทั้งแรงดึงผิวก็ไม่ลดลงด้วยเนื่องจากการเปียก

ที่ไม่ดีซึ่งจะเปลี่ยนส่วนโค้งที่ผิวสัมผัสและลดแรงดึงผิวของอะลูมิเนียมเหลวจึงทำให้ฟองอากาศแตกได้ง่ายแม้ในขณะที่มีขนาดเล็กก็ตามส่งผลให้เกิดการรวมตัวของฟองอากาศเป็นโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อมีโพรงอากาศใหญ่ขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งหมายถึงปริมาณโพรงอากาศที่น้อยลงและความหนาของผนังโพรงอากาศที่เล็กลงนั่นเอง ซึ่งจะทำให้ความกลมของโพรงอากาศน้อยลงจากโอกาสที่พื้นที่ผิวจะสัมผัสกับผนังโพรงอากาศอื่นๆจนเกิดการเสีรูปร่างจึงมีมากกว่า โดยโพรงอากาศขนาดใหญ่และมีความกลมที่ต่ำจะมีความเข้มข้นของความเค้นสะสมบริเวณที่เป็นเหลี่ยมมุมได้มากกว่าและจำนวนโพรงอากาศที่น้อยประกอบด้วยผนังโพรงอากาศที่ค่อนข้างบางจึงทำให้สามารถกระจายแรงอัดและการดูดซับพลังงานได้ไม่ดึนัก นอกจากนี้รูปร่างและขนาดของอนุภาคก็เป็นอีกปัจจัยที่อาจจะส่งผลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเช่นกันแต่ผลที่กระทบจะค่อนข้างน้อยเพราะด้วยขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กจึงส่งผลต่อการเปียกน้อยแม้ว่าอนุภาคที่มีความกลมกว่าจะมีการเปียกที่ดีกว่าและขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าก็จะมีารขาดขวางการไหลของอะลูมิเนียมเหลวได้ดีกว่า อีกทั้งในขณะที่รับแรงอัดอนุภาคที่มีความกลมมากกว่าจะมีความเข้มข้นของความเค้นบริเวณที่เป็นเหลี่ยมมุมซึ่งมักเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักน้อยกว่า จึงทำให้สามารถรับแรงอัดและดูดซับพลังงานได้ดีกว่า รวมทั้งอนุภาคขนาดเล็กก็จะสามารถรับและกระจายแรงอัดเพื่อดูดซับพลังงานได้ดีกว่าแต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับารเปียกและการกระจายตัวของอนุภาคเป็นหลัก

คงจะเห็นได้ว่าเมื่ออนุภาคอะลูมิเนียมมีรูปร่างค่อนข้างกลมและมีขนาดค่อนข้างเล็กประมาณ  $2 \mu\text{m}$  แต่มีการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคเสมือนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ประมาณ  $18.87 \mu\text{m}$  ประกอบกับความสามารถในการเปียกที่ไม่ค่อยดี (การเปียกที่ดีควรมีมุมสัมผัสไม่เกิน  $90^\circ$ ) จึงไม่สามารถทำให้ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้นได้เพราะมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ต่ำนั่นเอง

- ในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาซึ่งมีแนวโน้มของความเค้นรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและไม่ชัดเจนมากนัก (ดังแสดงในรูปที่ 4.19) สาเหตุที่เป็นไปได้น่าจะมาจากการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา ซึ่งจากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาบนผิวของผนังโพรงอากาศดีกว่าอนุภาคอะลูมิเนียมที่มีการรวมตัวเป็นกลุ่มบนผิว และจากรูปที่ 4.12 ยังแสดงให้เห็นว่าแม้จะไม่มีการเกาะกลุ่มกันอย่างชัดเจนของอนุภาคแต่เนื่องจากอนุภาคซิลิกามีมุมสัมผัสกับอะลูมิเนียมเหลวที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  ประมาณ  $140^\circ$  [54] ซึ่งมากกว่าอนุภาคอะลูมิเนียม (มุมสัมผัสยิ่งมากความสามารถในการเปียกยิ่งต่ำลง) แม้ว่าซิลิกาจะมีความหนาแน่น  $3.1 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งมากกว่าอะลูมิเนียมเหลวก็ตามแต่ยังทำให้อนุภาคโดยส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิวของผนังโพรงอากาศด้วยเหตุนี้แม้จะสามารถเพิ่มความหนืดให้แก่โฟมอะลูมิเนียมได้มากกว่าอนุภาคอะลูมิเนียมเล็กน้อยแต่ก็ไม่สามารถลดแรงดึงผิวได้มากนัก ขนาดโพรงอากาศจึงค่อนข้างใหญ่และมีความกลมน้อย ดังตารางที่ 4.2 ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดและดูดซับพลังงานไม่ค่อยดีนัก ส่วนขนาดและรูปร่างซึ่งส่งผลค่อนข้างน้อยต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเนื่องจากต้องขึ้นอยู่กับาร

เป็ยกและการกระจายตัวเป็นหลักนั้น สำหรับอนุภาคซิลิกาพบว่าเป็นอนุภาคที่มีเหลี่ยมมุม ซึ่งนอกจากจะทำให้ความสามารถในการเป็ยกลดลงแล้วยังทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นสะสมบริเวณเหลี่ยมมุมมากกว่าในขณะรับแรงอัดอีกด้วย แต่ยังสามารถเพิ่มความหนืดได้ดีกว่าอนุภาคอะลูมินา แม้ว่าอนุภาคซิลิกามีขนาดประมาณ  $5.38 \mu\text{m}$  ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคอะลูมินาเนื่องจากไม่มีการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคดังเช่นอนุภาคอะลูมินา โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาจึงมีเสถียรภาพมากกว่า ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่า การกระจายตัวของอนุภาคน่าจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานมากที่สุด

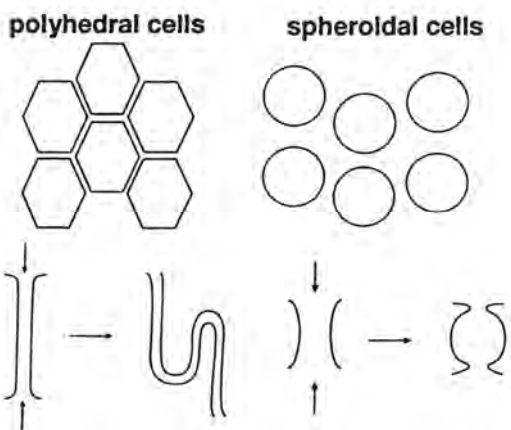
- จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าในกรณีโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ความเค้นรวมมีค่าสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ชัดเจนกว่าในกรณีของอนุภาคซิลิกา น่าจะเป็นเพราะนอกจากจะไม่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มระหว่างอนุภาคแล้วยังมีมุมสัมผัสที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  ประมาณ  $126^{\circ}$  [55] ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอนุภาคอะลูมินาและอนุภาคซิลิกา แต่เนื่องจากมีความหนาแน่นประมาณ  $2.65 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งน้อยกว่าอะลูมิเนียมเหลวซึ่งอาจจะเป็นเหตุผลที่ทำให้อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่บริเวณผิวของผนังโพรงอากาศได้ดังรูปที่ 4.10 มากกว่าในเนื้อของโฟมอะลูมิเนียมดังรูปที่ 4.13 จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานลดลง โดยการกระจายตัวที่ดีกว่าของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทำให้มีความกลมของโพรงอากาศมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาและโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกา แม้ว่าจะมีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยมากกว่าก็ตาม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่น่าจะส่งผลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานแต่ค่อนข้างน้อยเพราะต้องขึ้นอยู่กับการเป็ยกและการกระจายตัวเป็นหลัก ซึ่งอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นอนุภาคที่มีเหลี่ยมมุมนอกจากจะทำให้ความสามารถในการเป็ยกลดลงแล้วยังทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นสะสมบริเวณเหลี่ยมมุมมากกว่าในขณะรับแรงอัด แต่ก็ยังสามารถเพิ่มความหนืดได้พอสมควรแม้ว่าอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีขนาดประมาณ  $7.11 \mu\text{m}$  ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคอะลูมินาและอนุภาคซิลิกา เนื่องจากไม่มีการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคดังเช่นอนุภาคอะลูมินา โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จึงมีเสถียรภาพมากกว่า ดังรูปที่ 4.6

- ในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ดังรูปที่ 4.27 ที่ความเค้นรวมมีค่าสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ชัดเจนใกล้เคียงกับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ น่าจะเป็นเพราะนอกจากจะไม่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มระหว่างอนุภาคแล้วยังมีมุมสัมผัสที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  ประมาณ  $116.1^{\circ}$  [56] ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นๆ โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคทั่วทั้งบริเวณผิวของผนังโพรงอากาศและในเนื้อของโฟมอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.14 อีกทั้งยังเป็นอนุภาคที่มีความหนาแน่นมากที่สุดประมาณ  $4.94 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งนอกจากจะช่วยให้อนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ส่วนใหญ่จมลงใ้เนื้ออะลูมิเนียมเหลวแล้ว ขนาดของอนุภาคที่เล็กทำให้มี

จำนวนอนุภาคที่มากกว่าเมื่อเทียบกับในน้ำหนักรที่เท่ากันยังช่วยขัดขวางการไหลของอะลูมิเนียมเหลวได้ดี ดังนั้นความหนืดของโพลีอะลูมิเนียมเหลวจึงเพิ่มขึ้นเกิดการไหลของอะลูมิเนียมเหลวได้ยาก ขณะที่รับแรงอัดเนื่องจากการเป็ยกที่คิดว่าอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นๆ ประกอบกับการกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างทั่วถึงจึงช่วยในการรับแรงอัดและดูดซับพลังงานได้ค่อนข้างดี แม้จะมีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยใหญ่ที่สุดแต่ก็มีลักษณะโพรงอากาศที่กลมที่สุดด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ  $1.16 \mu\text{m}$  นอกจากจะมีการขัดขวางการไหลของอะลูมิเนียมเหลวที่ดีทำให้สามารถรับและกระจายแรงอัดเพื่อดูดซับพลังงานได้ค่อนข้างดีแล้วยังทำให้ค่าความหนาของผนังโพรงอากาศวิกฤต (Critical cell wall thickness) ต่ำเพราะหากผนังโพรงอากาศมีความหนาต่ำกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคจะเกิดการบิดขาดของผนังโพรงอากาศจึงเปรียบเสมือนไม่มีตัวเชื่อมระหว่างผนังโพรงอากาศโพรงอากาศจึงแตกและรวมตัวกันได้ ประกอบกับแรงตึงผิวที่ลดลงด้วยจึงทำให้โพรงอากาศแตกและรวมตัวกันได้ยากขึ้น ซึ่งโพรงอากาศที่โตขึ้นยังมีลักษณะค่อนข้างกลมอยู่เพราะหากเกิดการรวมตัวของโพรงอากาศเป็นโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้แรงดันรวมภายในลดลงซึ่งอาจทำให้โพรงอากาศอื่นที่มีแรงดันมากกว่าบีบให้เกิดการเสีรูปร่างได้ง่าย แม้ว่าโพรงอากาศขนาดใหญ่หรือจำนวนโพรงอากาศที่น้อยประกอบกับผนังโพรงอากาศที่ค่อนข้างบางทำให้สามารถกระจายแรงอัดและดูดซับพลังงานได้น้อยกว่าแต่ความกลมของโพรงอากาศก็สามารถช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นบนผนังโพรงอากาศได้ ส่วนรูปร่างของอนุภาคก็เป็นอีกปัจจัยที่น่าจะส่งผลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเช่นกันแต่ค่อนข้างน้อยเพราะขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กจึงมีขนาดเล็กมุ่มที่เล็กกว่าทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับการเป็ยก (มุมสัมผัสระหว่างอนุภาคเซรามิกกับอะลูมิเนียมเหลว) และการกระจายตัวของอนุภาคซึ่งอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์เป็นอนุภาคที่มีเหลี่ยมมุมนอกจากจะทำให้ความสามารถในการเป็ยกลดลงแล้วยังทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นสะสมบริเวณเหลี่ยมมุมมากกว่าในขณะรับแรงอัด แต่เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคและความสามารถในการเป็ยกที่คิดว่าอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นๆ จึงทำให้สามารถกระจายแรงอัดและดูดซับพลังงานได้ค่อนข้างดี

จากการวิจารณ์ผลการทดลองข้างต้นและจากการนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับระหว่างรูปที่ 4.31, 4.33, 4.35 และ 4.37 แสดงให้เห็นว่าในกรณีของโพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินา นอกจากจะส่งผลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานค่อนข้างน้อย แม้ว่าจะมีอนุภาคขนาดเล็กและมีลักษณะกลมมากที่สุดดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นอันเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักเมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นๆ ก็ตามเนื่องจากความสามารถในการเป็ยกที่ต่ำ (มุมสัมผัสเท่ากับ  $127^\circ$ ) และมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มลอยอยู่บนผิวอะลูมิเนียมเหลว อีกทั้งยังทำให้เสถียรภาพของโพลีลดลงจากการที่ของเหลวเกิดการแยกตัวรอบๆ อนุภาค ซึ่งเป็นการยืนยันว่าความสามารถในการเป็ยกและการกระจายตัวของอนุภาคน่าจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อ

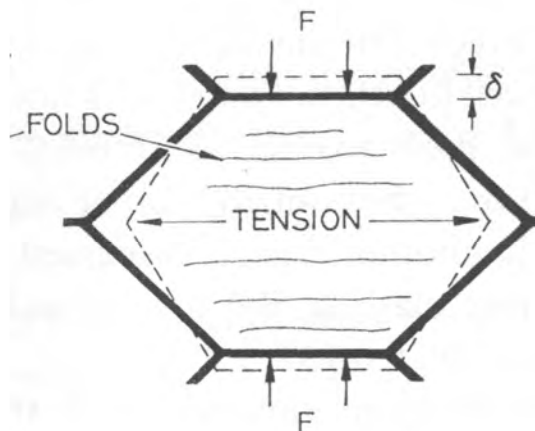
ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงาน และสำหรับการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์และโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีค่ามากกว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาซึ่งมีลักษณะของโพรงอากาศที่กลมน้อยกว่า แม้ว่าจะมีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยที่เล็กกว่าก็ตาม (ดังตารางที่ 4.2) โดยแสดงให้เห็นว่าลักษณะของโพรงอากาศส่งผลต่อการดูดซับพลังงานมากกว่าขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยซึ่งน่าจะเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มขนาดโพรงอากาศ [23] นอกจากนี้ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าจะทำให้มีขนาดโพรงอากาศใหญ่กว่าส่งผลให้ความหนาของผนังโพรงอากาศลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตรเท่ากัน [16] เนื่องจากแนวโน้มการรวมตัวกันของโพรงอากาศเกิดได้ง่ายเสถียรภาพของโฟมจึงลดลงตามไปด้วย เพราะผนังโพรงอากาศเป็นพื้นที่รับแรงและการรวมตัวกันของโพรงอากาศหมายถึงการลดลงของผนังโพรงอากาศ จึงทำให้โฟมอะลูมิเนียมรับแรงอัดได้น้อยลง นอกจากนี้รูปร่างและความสม่ำเสมอของโพรงอากาศ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับพลังงาน โดยหากรูปร่างมีลักษณะเป็นวงกลมหรือใกล้เคียงและมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งโฟมอะลูมิเนียมหรือถ้าไม่มีรูปร่างเป็นวงกลมก็ควรจะมีรูปร่างที่มีทิศทางขนานกับแรงเป็นหลัก [22] ซึ่งจะทำให้โฟมอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงและดูดซับพลังงานได้มากขึ้น ดังนั้นหากโพรงอากาศมีรูปร่างเป็นวงกลมจะทำให้มีความหนาของผนังโพรงอากาศมากขึ้นการรับแรงจึงดีขึ้น ส่วนโพรงอากาศที่มีทิศทางขนานกับแรงนั้นผนังโพรงอากาศจะมีความยาวในทิศนั้นมากกว่าทำให้สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า ดังรูปที่ 5.1 นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีการดูดซับพลังงานที่ดีที่สุดเพราะมีขนาดของอนุภาคเล็กที่สุดที่น้ำหนักเท่ากันจึงมีจำนวนอนุภาคที่ช่วยในการรับแรงมากกว่า



รูปที่ 5.1 แสดงรูปร่างของโพรงอากาศและลักษณะการรับแรงอัด [44]

### 5.1.2 ในกรณีที่โคมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อ

เมื่อนำโคมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ในท่อทำให้ความเค้นรวมสูงกว่าโคมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ชัดเจน เพราะเมื่อใส่ท่อเข้าไปแล้วขณะที่รับแรงอัดการเสีรูปร่างของท่อจะบีบอัดให้เนื้อของโคมอะลูมิเนียมทางด้านข้างแน่นขึ้นส่วนเนื้อของโคมอะลูมิเนียมบางส่วนก็เสีรูปร่างอยู่ระหว่างชั้นรอยหยักของท่อ รวมทั้งขณะที่ได้รับความเค้นอัดในทิศทางขนานกับโคมอะลูมิเนียมยังได้รับในทิศทางตั้งฉากด้วยจากการเสีรูปร่างของท่อโดยจะต้านกับความเค้นดึงที่เกิดในโพรงอากาศ ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักตามรอยแยกระหว่างอนุภาคกับโคมอะลูมิเนียมได้ง่าย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการเป็ยก (อนุภาคเซรามิกที่ใช้ทุกชนิดมีมุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$ ) ส่งผลต่อการดูดซับพลังงานของโคมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อค่อนข้างน้อย



รูปที่ 5.2 แสดงแรงที่เกิดขึ้นแก่โพรงอากาศในขณะที่ได้รับแรงอัด [5]

- การเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.15 กับ 4.17 แสดงให้เห็นว่าแม้แต่ออนุภาคอะลูมินาที่มีความสามารถในการเป็ยกต่ำและขนาดของอนุภาคอะลูมินาที่แท้จริงมีขนาดค่อนข้างเล็กซึ่งน่าจะกระจายแรงอัดและดูดซับพลังงานได้ดีแต่มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักแต่ยังสามารถเพิ่มความเค้นรวมได้ เนื่องจากได้รับแรงอัดในทิศทางตั้งฉากด้วยจากการเสีรูปร่างของท่อโดยจะต้านกับความเค้นดึงที่เกิดในโพรงอากาศ ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย ทั้งนี้จุดเริ่มต้นของการแตกหักที่อยู่ในกลุ่มของอนุภาคจะเริ่มแตกหักช้าลงจากการต้านโดยแรงอัดของท่อ ขนาดและรูปร่างโพรงอากาศเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่น่าจะส่งผลต่อความเค้นรวมและการดูดซับพลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.50 โดยโคมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาสามารถเพิ่มการดูดซับพลังงานได้มากกว่าโคมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เท่านั้น ทั้งนี้ที่น่าจะเป็นเพราะความกลมของโพรงอากาศที่ต่ำที่สุดซึ่งรูปร่างที่ได้จะมีความเป็นสมมาตรน้อยและมีโอกาสที่จะมีบริเวณที่เป็นเหลี่ยมมุมได้ค่อนข้างมากทำให้เกิดการสะสมของความเค้นได้ง่าย

ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานทำได้ไม่ดี แม้ว่าจะมีขนาดของโพรงอากาศเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดซึ่งสามารถกระจายและรับแรงอัดได้ค่อนข้างดีก็ตาม นอกจากนี้ด้วยขนาดของอนุภาคอะลูมินาซึ่งมีค่าน้อยที่สุดรองจากอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์เท่านั้น ทำให้มีจำนวนอนุภาคที่มากในน้ำหนักที่เท่ากันน่าจะเป็นอีกปัจจัยที่ช่วยให้สามารถรับความเค้นและดูดซับพลังงานได้มากขึ้น

- ในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาซึ่งมีขนาดอนุภาคเท่ากับ  $5.38 \mu\text{m}$  และยังมี การกระจายตัวของอนุภาคบนผนังโพรงอากาศค่อนข้างดี ดังรูปที่ 4.10 จึงทำให้มีการดูดซับพลังงานมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาดังรูปที่ 4.50 นอกจากนี้ยังมีความกลมของโพรงอากาศมากกว่าอีกด้วย แม้ว่าจะมีขนาดของโพรงอากาศเฉลี่ยมากกว่าก็ตาม น่าจะเป็นเพราะในขณะที่รับแรงอัดที่จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยรับแรงแทนความหนาที่ลดลง (พื้นที่หน้าตัด) ของผนังโพรงอากาศเมื่อโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ แต่รูปร่างของโพรงอากาศที่มีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นของความเค้นยังมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานค่อนข้างมาก

- จากผลการทดลอง ในรูปที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $7.11 \mu\text{m}$  และมีความหนาแน่นน้อยที่สุดประมาณ  $2.65 \text{ g/cm}^3$  ด้วยทำให้มีการดูดซับพลังงานต่ำที่สุดประมาณ 38 MPa อาจเนื่องมาจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะเกิดการแตกของอนุภาคได้ง่ายกว่า ประกอบกับจำนวนอนุภาคที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักเท่ากันแม้ว่าจะมีความกลมของโพรงอากาศที่สูงก็ตาม ทั้งนี้ขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานไม่ดีแต่ยังเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลค่อนข้างน้อย

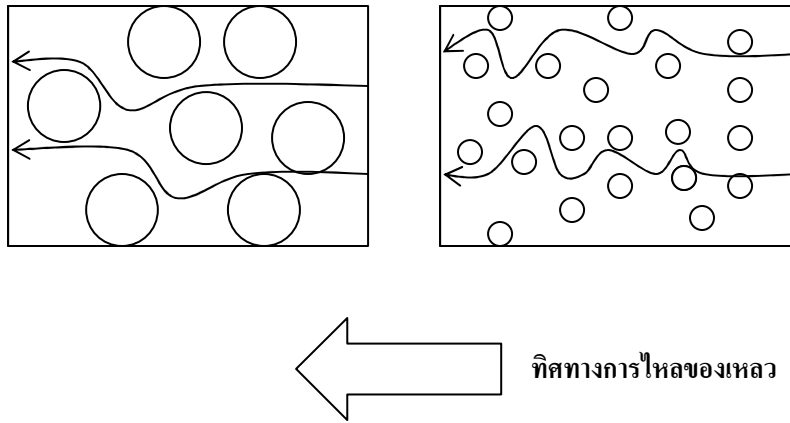
- จากผลการทดลอง ในรูปที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ  $1.16 \mu\text{m}$  เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นจึงมีจำนวนอนุภาคมากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักเท่ากัน ซึ่งมีการดูดซับพลังงานที่สูงที่สุดประมาณ 55 MPa น่าจะเป็นเพราะอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวทั้งบริเวณผิวและในเนื้อของผนังโพรงอากาศจึงสามารถรับและกระจายแรงได้ดี นอกจากนี้ความกลมของโพรงอากาศก็น่าจะมีอิทธิพลค่อนข้างมาก โดยโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีโพรงอากาศที่กลมที่สุด แต่มีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยสูงที่สุดซึ่งไม่สามารถทำให้ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานลดลงได้มากนัก จึงอาจเป็นการยืนยันได้ว่าขนาดของโพรงอากาศมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานค่อนข้างน้อยในกรณีที่น่าโฟมอะลูมิเนียมมาใส่ท่อ



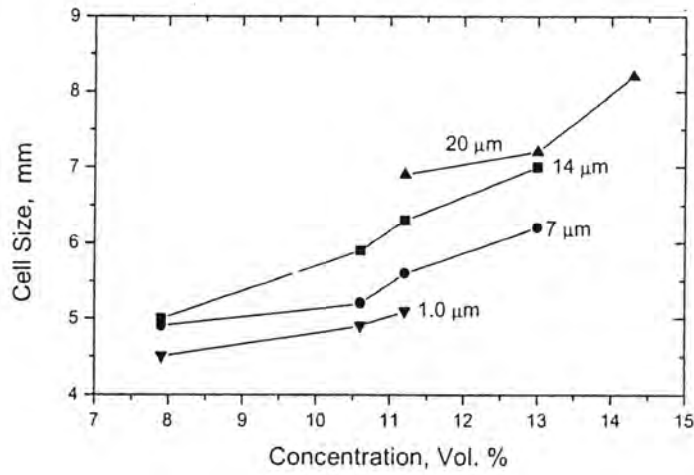
## 5.2 ผลของปริมาณอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงาน

### 5.2.1 ในกรณีที่โพลีเมอร์นิยมเสริมอนุภาคเซรามิกไม่ใส่ท่อ

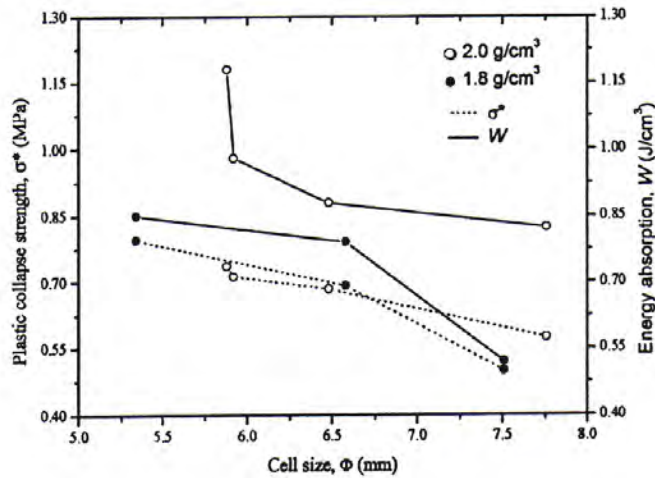
- จากผลการทดลองในรูปที่ 4.46 สังเกตได้ว่า เมื่อเติมอนุภาคอะลูมินาลงในโพลีเมอร์นิยมในปริมาณที่มากขึ้นแทบจะไม่ส่งผลต่อความเค้นรวมและการดูดซับพลังงานเลย ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.46 ตามลำดับ โดยมีค่าการดูดซับพลังงานลดลงต่ำกว่าโพลีเมอร์นิยมบริสุทธิ์ที่ปริมาณอนุภาคอะลูมินา 3 wt.% และ 5 wt.% แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอน่าจะมีสาเหตุเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคอะลูมินาซึ่งจะมีพฤติกรรมเสมือนอนุภาคขนาดใหญ่แต่มีจุดเริ่มต้นของการแตกหัก (Crack initiation) มากกว่า ส่งผลให้ไม่สามารถช่วยเพิ่มความเหนียวเพราะนอกจากจะมีอากาศเก็บกักอยู่ภายในค่อนข้างมากทำให้อนุภาคลอยตัวขึ้นสู่บริเวณผิวของอะลูมิเนียมเหลวแล้ว อนุภาคที่อยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมเหลวยังไม่สามารถขัดขวางการไหลของอะลูมิเนียมเหลวได้มากนัก ดังรูปที่ 5.3 และในขณะที่รับแรงอัดก็ไม่สามารถกระจายและดูดซับพลังงานได้มากนัก อีกทั้งมุมสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมเหลวและอนุภาคอะลูมินายังมีค่าค่อนข้างมากที่อุณหภูมิ 800°C ประมาณ 127° [53] ซึ่งเมื่อมีปริมาณอนุภาคอะลูมินามากขึ้นจะยิ่งทำให้กลุ่มของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและไปกองกันอยู่ที่ผิวดังที่กล่าวไว้ข้างต้น รวมทั้งเมื่อเติมอนุภาคเซรามิกลงไปมากขึ้นจะทำให้ขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้น [16] ดังรูปที่ 5.4 ประกอบกับความกลมที่ต่ำดังตารางที่ 4.2 จึงทำให้เสถียรภาพของโพลีเมอร์นิยมลดลง โดยโพรงอากาศขนาดใหญ่และมีความกลมที่ต่ำจะมีความเข้มข้นของความเค้นสะสมบริเวณที่เป็นเหลี่ยมได้มากกว่าและจำนวนโพรงอากาศที่น้อยประกอบกับผนังโพรงอากาศที่ค่อนข้างบาง ส่งผลให้เกิดความเค้นต่อพื้นที่มากกว่าผนังโพรงอากาศที่หนา ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานจึงลดลงด้วย ดังรูปที่ 5.5 [23] นอกจากนี้อนุภาคอะลูมินายังมีขนาดอนุภาคเล็ก รองจากอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์เท่านั้น จำนวนอนุภาคจึงมีค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับในน้ำหนัที่เท่ากัน ทั้งนี้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าอนุภาคที่มีความสามารถในการเปียกดีอาจทำให้ผนังโพรงอากาศไม่ต่อเนื่องกันเกิดเป็นจุดบกพร่องได้ดังนั้นจำนวนอนุภาคที่มากจึงมีโอกาสในการเกิดจุดบกพร่องมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งน่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่อธิบายว่าทำไมเมื่อเติมอนุภาคเซรามิกมากขึ้นแต่ความเค้นรวมและการดูดซับพลังงานกลับลดลง



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบการเพิ่มความหนืดระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็ก

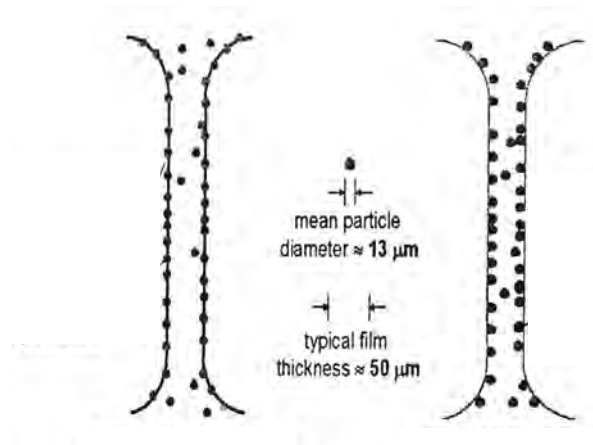


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับปริมาณอนุภาค [16]



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงอากาศกับความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงาน [23]

• การเพิ่มปริมาณซิลิกาแม้จากหัวข้อที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่าสามารถเพิ่มความเค้นรวมและการดูดซับพลังงานได้แต่เมื่อปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มการดูดซับพลังงานได้สูงสุดในช่วง 1 wt.% ถึง 3 wt.% เท่านั้น แม้ว่าอนุภาคซิลิกาจะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์แต่มีมุมสัมผัสมากกว่า ( $140^\circ$ ) เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิกามากขึ้นจึงทำให้เคลื่อนที่ได้ไม่ดีเพราะการเกาะกันเป็นกลุ่มของอนุภาคที่มากขึ้นขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคอื่นๆ ดังนั้นนอกจากจะไม่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพแก่โฟมแล้วยังลดเสถียรภาพอีกด้วย [57] ซึ่งรูปที่ 5.6 เปรียบเทียบระหว่างอนุภาคที่มีการเปียกต่ำ (รูปด้านซ้าย) ซึ่งอนุภาคอยู่บนผิวของผนังโพรงอากาศและเกาะกลุ่มกันได้ง่ายทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่เพื่อช่วยเพิ่มความหนืดและลดการไหลของอะลูมิเนียมเหลวได้ ต่างจากอนุภาคที่มีความสามารถในการเปียกสูง (รูปด้านขวา) ซึ่งอนุภาคจะจมลงไปบนผนังโพรงอากาศและขัดขวางการเคลื่อนที่ของอะลูมิเนียมเหลว นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกบนผนังโพรงอากาศก็ส่งผลต่อการดูดซับพลังงานเช่นกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.10 กับผลการทดลองในรูปที่ 4.46 พบว่า เมื่อเติมอนุภาคซิลิกาซึ่งมีการกระจายตัวบนผนังโพรงอากาศดีที่สุดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้มีค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดตามไปด้วย แต่เนื่องจากความสามารถในการเปียกที่ต่ำที่สุดจึงส่งผลให้สามารถดูดซับพลังงานสูงที่สุดได้ที่ปริมาณอนุภาคเซรามิก 3 wt.% เท่านั้น ส่วนที่ปริมาณ 5 wt.% ความเค้นรวมและการดูดซับพลังงานลดลงน่าจะเป็นเพราะเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคเซรามิกจะทำให้โพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 5.4 ซึ่งอนุภาคซิลิกามีอนุภาคค่อนข้างใหญ่ใกล้เคียงกับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ โพรงอากาศที่ได้จึงค่อนข้างใหญ่ประกอบกับความหนาของผนังโพรงอากาศที่ลดลงจึงทำให้การกระจายแรงอัดและดูดซับพลังงานไว้ทำได้น้อยลง



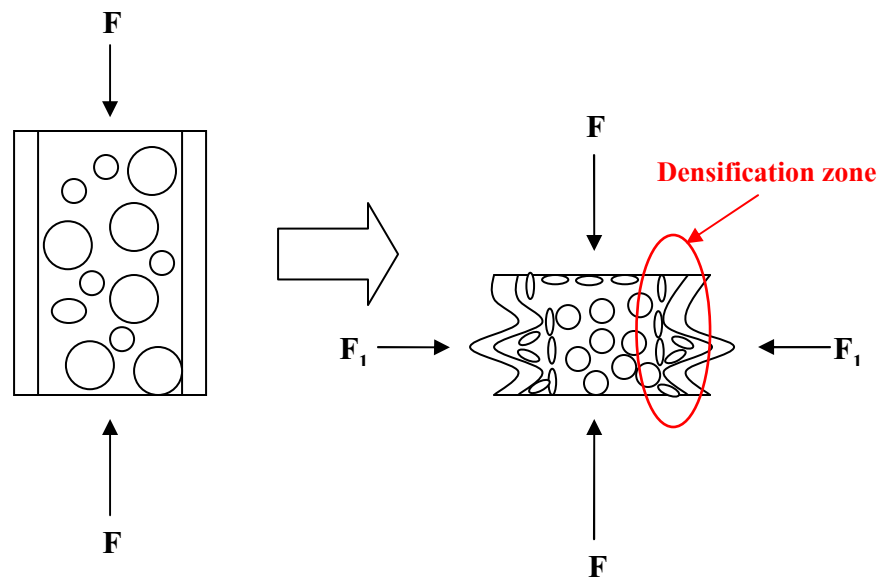
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนผิวเนื้อฟีนโลหะ [57]

- จากรูปที่ 4.46 พบว่าโพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถเพิ่มการดูดซับพลังงานได้เฉพาะในช่วง 3 wt.% ถึง 5 wt.% ที่เป็นเช่นนี้เพราะแม้จะไม่มีกรรมรวมตัวกันเป็นกลุ่มระหว่างอนุภาคแล้วยังมีมุมสัมผัสระหว่างอนุภาคกับอะลูมิเนียมเหลวที่น้อยกว่าอนุภาคอะลูมินาและอนุภาคซิลิกา แต่เนื่องจากมีความหนาแน่นประมาณ  $2.65 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งน้อยกว่าอะลูมิเนียมเหลวทำให้อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่บริเวณผิวของผนังโพรงอากาศมากกว่าในเนื้อของโพลีอะลูมิเนียมส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดและการดูดซับพลังงานลดลงและขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดทำให้มีจำนวนอนุภาคที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นที่น้ำหนักเท่ากัน ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณอนุภาคถึง 5 wt.% จึงจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงและการดูดซับพลังงานได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ขนาดอนุภาคอาจจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อขนาดโพรงอากาศดังรูปที่ 5.5 คือ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคเซรามิกจะทำให้โพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่น จึงควรมีขนาดโพรงอากาศที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเซรามิก แต่กลับสามารถเพิ่มความแข็งแรงและการดูดซับพลังงานได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณ 5 wt.% อาจเป็นเพราะอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆมีปฏิกิริยากับโพลีอะลูมิเนียมที่แตกต่างกันซึ่งงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาจึงไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนนัก

- จากรูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นว่าโพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์สามารถเพิ่มการดูดซับพลังงานได้ถึงปริมาณ 5 wt.% โดยเฉพาะในช่วง 3 wt.% ถึง 5 wt.% แต่เพิ่มในอัตราที่ต่ำ ซึ่งเหตุผลที่เป็นไปได้น่าจะมาจากอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีความหนาแน่นสูงที่สุดประมาณ  $4.94 \text{ g/cm}^3$  เมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่น รวมถึงมีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดดังนั้นที่น้ำหนักเท่ากันจะมีจำนวนอนุภาคมากกว่า ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงและการดูดซับพลังงานที่ปริมาณ 1 wt.% ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นแต่หลังจากนั้นสามารถเพิ่มได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น น่าจะเป็นเพราะโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่เพิ่มขนาดขึ้นจากการเพิ่มปริมาณอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นๆประกอบด้วยผนังโพรงอากาศที่ค่อนข้างบาง เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ  $1.16 \mu\text{m}$  จึงทำให้ค่าความหนาของโพรงอากาศวิกฤตต่ำ โดยสามารถกระจายแรงอัดและดูดซับพลังงานได้น้อยกว่าโพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ แม้ว่าจะไม่มีกรรมรวมตัวกันเป็นกลุ่มระหว่างอนุภาคและมีมุมสัมผัสระหว่างอนุภาคกับอะลูมิเนียมเหลวที่น้อยที่สุดที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  ประมาณ  $116.1^\circ$  ก็ตาม โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคทั่วทั้งบริเวณผิวของผนังโพรงอากาศและในเนื้อของโพลีอะลูมิเนียมก็ตาม แต่ความกลมของโพรงอากาศก็สามารถช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นบนผนังโพรงอากาศได้ ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการดูดซับพลังงานไม่มากนักอาจเป็นเพราะอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆมีปฏิกิริยากับโพลีอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน

## 5.2.2 ในกรณีที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อ

โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกเมื่อนำมาใส่ท่อแล้วรับแรงอัดพบว่า เมื่อเติมอนุภาคเซรามิกทุกชนิดในปริมาณอนุภาคที่มากขึ้น แม้จะทำให้ขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้นตามไปด้วยดังที่กล่าวในหัวข้อ 5.2.1 (รวมทั้งอะลูมินาซึ่งส่งผลต่ออะลูมิเนียมโฟมค่อนข้างน้อยในกรณีที่ไม่ใส่ท่อ) แต่ก็สามารถทำให้ความเค้นรวมเพิ่มขึ้นได้ ดังรูปที่ 4.17, 4.21, 4.25 และ 4.29 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าขนาดของโพรงอากาศส่งผลต่อความเค้นรวมเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการนำโฟมอะลูมิเนียมมาใส่ท่อซึ่งการเติมอนุภาคเซรามิกลงไป ในโฟมอะลูมิเนียมมากขึ้นจะส่งผลมากกว่า โดยไม่ว่าขนาดและลักษณะของโพรงอากาศจะเป็นเช่นไร เมื่อได้รับแรงอัดทั้งจากทิศขนานชิ้นงาน โฟมอะลูมิเนียมและจากทิศตั้งฉากซึ่งมาจากการเสีรูปร่างของท่อทำให้โพรงอากาศเกิดการบีบอัดตัว (densification) ทางด้านข้าง ดังนั้นความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมทางด้านข้างจึงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.7 อีกทั้งการเติมอนุภาคเซรามิกลงไปยังช่วยรับและกระจายแรงอัดจากการเสีรูปร่างของท่อไว้ทำให้ความเค้นรวมสูงขึ้น ซึ่งยังมีปริมาณอนุภาคเซรามิกมากหมายถึงการเพิ่มตัวรับและกระจายแรงมากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะการบีบอัดโพรงอากาศทางด้านข้างจากท่อ

- จากผลการทดลองในรูปที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเติมอนุภาคเซรามิกทุกชนิดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้การดูดซับพลังงานมีมากขึ้นแม้แต่อนุภาคอะลูมินาที่ส่งผลต่อโฟมอะลูมิเนียมไม่มากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคมากขึ้นการดูดซับพลังงานก็สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้แนวโน้มในการเพิ่มการดูดซับพลังงานเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคจะทำให้การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้าในช่วงแรกและจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่มีปริมาณอนุภาคอะลูมินา 1 wt.% ถึง 3 wt.% ก่อนจะเพิ่มอย่าง

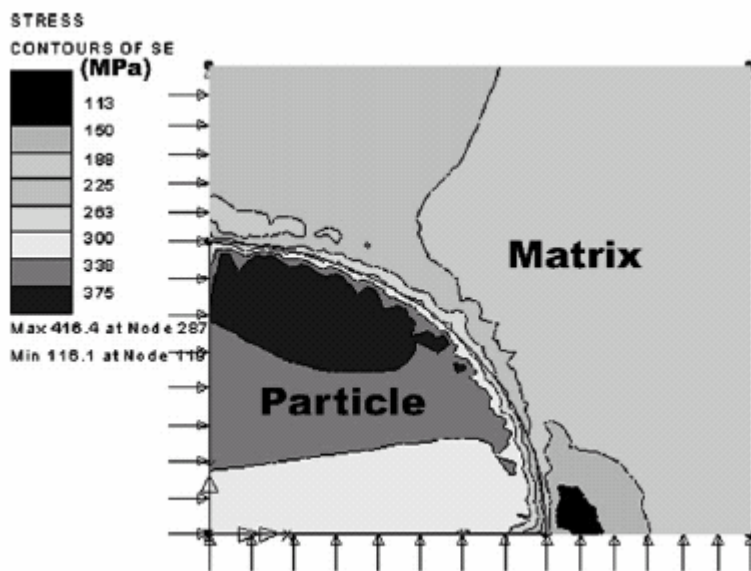
ซ้ำๆจนถึง 5 wt.% น่าจะเป็นเพราะยิ่งเพิ่มปริมาณอนุภาคก็จะยิ่งทำให้มีโอกาสที่อนุภาคจะเกาะกลุ่มกันมากขึ้นและเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักได้มากขึ้น แต่ที่ปริมาณ 5 wt.% ยังมีการดูดซับพลังงานมากกว่าโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์อาจเนื่องมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าทำให้มีจำนวนอนุภาคในการช่วยรับแรงมากกว่าแม้จะมีจุดเริ่มต้นของการแตกหักมากขึ้นดังกล่าวไว้ข้างต้นก็ตาม ส่วนขนาดโพรงอากาศก็อาจเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความเหนียวและการดูดซับพลังงานแต่ดูเหมือนว่าจะไม่มีผลมากดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.1.2 รวมทั้งความกลมของโพรงอากาศซึ่งน่าจะมีอิทธิพลมากกว่า แต่ในกรณีนี้ก็กลับพบว่ามีความกลมของโพรงอากาศที่ต่ำที่สุดจึงน่าจะทำให้การดูดซับพลังงานลดลงพอสมควร

- โพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกาเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิกาพบว่ามีความเหนียวของการดูดซับพลังงานมากขึ้นจนถึงที่ปริมาณ 5 wt.% ดังรูปที่ 4.50 น่าจะเป็นเพราะการกระจายตัวของอนุภาคที่ค่อนข้างดีซึ่งโอกาสที่จะมีจุดเริ่มต้นของการแตกหักน้อยทำให้สามารถรับความเค้นและดูดซับพลังงานได้มากกว่าแม้ว่าจะมีความหนาแน่นมากกว่าอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เท่านั้น นอกจากนี้ขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยและความกลมของโพรงอากาศน่าจะส่งผลเช่นกันเนื่องจากจะเห็นว่าในช่วงตั้งแต่ไม่ได้เติมอนุภาคไปจนถึงอนุภาคปริมาณ 3 wt.% มีการดูดซับพลังงานมากกว่าโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมีความหนาแน่นมากที่สุด แต่หลังจากนั้นก็กลับมีการดูดซับพลังงานน้อยกว่าซึ่งความกลมที่น้อยกว่าน่าจะส่งผลทำให้การดูดซับพลังงานลดลง ส่วนขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยอาจส่งผลน้อยมาก

- โพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคในรูปที่ 4.50 แสดงให้เห็นว่ามีความเหนียวของการดูดซับพลังงานมากขึ้นจนถึงที่ปริมาณ 5 wt.% แต่มีการดูดซับพลังงานที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นๆ อาจเป็นเพราะขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดทำให้น้ำหนักที่เท่ากันมีจำนวนอนุภาคน้อยกว่า แม้จะมีการกระจายตัวที่ดีพอควรรวมทั้งความกลมของโพรงอากาศที่ดีซึ่งจะช่วยในการรับแรงได้ดีขึ้นก็ตาม ส่วนขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยส่งผลค่อนข้างน้อยดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

- โพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคมีความเหนียวของการดูดซับพลังงานมากขึ้นจนถึงที่ปริมาณ 5 wt.% เช่นกัน อีกทั้งยังมีการดูดซับพลังงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ  $1.16 \mu\text{m}$  และมีจำนวนอนุภาคมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เท่ากัน โดยปริมาณอนุภาคเซรามิกที่มากขึ้นส่งผลให้การไหลของความเค้น (Flow stress) ทำได้ยากขึ้นจึงเกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งความร้อนในแต่ละจุดจะมากขึ้นส่งผลให้โพลีเอทิลีนมีความอ่อนตัวมากขึ้น ดังนั้นในขณะที่รับแรงอัดการดูดซับพลังงานจะขึ้นอยู่กับอนุภาคเซรามิกซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าโพลีเอทิลีนจึงสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่า ยิ่งไปกว่านั้นการนำโพลีเอทิลีนไปใส่ในท่อยังเพิ่มความเค้นทางด้านข้างของชิ้นงานอีกทำให้บริเวณที่มีอนุภาคมีความเข้มข้นของความ

เค้นสูงขึ้นไปอีก [31] โดยรูปที่ 5.8 แสดงความเค้นที่สะสมบริเวณอนุภาคเซรามิกจากสองทิศทาง ทั้งจากหัวกด (แกน Y) และจากท่อ (แกน X) สังเกตเห็นว่าความเค้นที่มากที่สุดสามอันดับแรก คือ 375 338 และ 300 MPa อยู่ภายในอนุภาคทั้งสิ้น ส่วนบริเวณรอบๆอนุภาคจะมีความเค้นลดหลั่นลงมาตามระยะห่างจากอนุภาค นอกจากนี้ความกลมของโพรงอากาศก็น่าจะเป็นอีกเหตุผลหนึ่งในการเพิ่มการดูดซับพลังงานมากขึ้น รวมทั้งขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยซึ่งมีอิทธิพลน้อยเช่นกัน



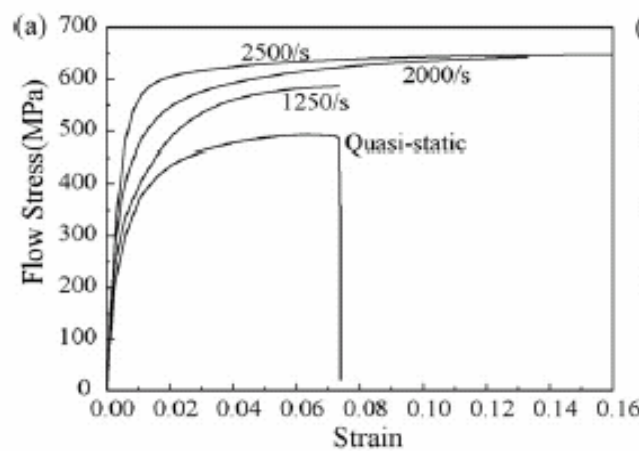
รูปที่ 5.8 การสะสมของแรงบริเวณอนุภาคเซรามิก [58]

### 5.3 ผลของความเร็วจุดที่มีต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงาน

#### 5.3.1 ในกรณีที่โม่อะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกไม่ใส่ท่อ

ความเค้นรวมของโม่อะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่มีความเร็วหัวกด 50 mm/min มีค่ามากกว่าที่มีความเร็วหัวกด 5 mm/min ทุกชนิดประมาณ 33% อีกทั้งที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min ยังสังเกตเห็นความเค้นรวมมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับโม่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ได้ชัดเจนกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min อีกด้วย รวมทั้งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากรูปที่ 4.31, 4.33, 4.35 และ 4.37 ยังพบว่าโม่อะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่มีความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานสูงที่สุดและสูงกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ซึ่งน่าจะเป็นเพราะการรับแรงอัดของโม่อะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกจะมีความเค้นรวมเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีความเร็วหัวกดเพิ่มมากขึ้น เพราะการไหลของความเค้นที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วของหัวกดดังรูปที่ 5.9 ทำให้ที่ความเร็วหัวกดสูง บริเวณรอบอนุภาคซึ่งมีความเข้มข้นความเค้นค่อนข้างมากเกิดความร้อนสูงกว่าที่ความเร็วหัวกดต่ำ

ซึ่งการเพิ่มความแข็งเนื่องจากความเครียด (Strain hardening) ในบริเวณนี้จึงลดต่ำลงด้วยอีกทั้ง โฟมอะลูมิเนียมโดยรอบยังมีการอ่อนตัวที่มากกว่า ดังนั้นภาระการรับแรงอัดจึงส่งผ่านไปยังอนุภาคเซรามิกซึ่งมีความแข็งแกร่งมากกว่าทำให้มีความแข็งแรงอัดมากขึ้น [59] นอกจากนี้อีกสาเหตุหนึ่งที่เป็นไปได้ น่าจะมาจากขณะที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกได้รับแรงอัด แก๊สที่อยู่ภายในโพรงอากาศจะถูกอัดเมื่อโพรงอากาศเริ่มยุบตัวจากแรงอัด ดังนั้นแก๊สจึงไหลไปยังโพรงอากาศที่ยังไม่ได้รับแรงอัดทางด้านล่างโดยไม่มีเวลาในการไหลออกจากชิ้นงานมากนักทำให้ความหนาแน่นของแก๊สในโพรงอากาศมีมากกว่าที่ความเร็วหัวกดต่ำ [44] ด้วยเหตุนี้โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ความเร็วหัวกดที่สูงกว่าจึงมีการดูดซับพลังงานที่มากกว่า ซึ่งแบ่งพิจารณาตามชนิดของอนุภาคเซรามิกได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบการไหลของความเค้นที่ความเร็วหัวกดต่างๆกัน [59]

- ในกรณีของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินามีการดูดซับพลังงานเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดเป็น 50 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ดังรูปที่ 4.31 น่าจะเป็นเพราะอนุภาคอะลูมินานอกจากจะมีการเกาะกลุ่มระหว่างอนุภาคแล้ว ยังมีการกระจายตัวยังต่ำที่สุดอีกด้วยทำให้เวลาที่เพิ่มความเร็วหัวกดบริเวณที่เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักซึ่งมักจะอยู่ในกลุ่มของอนุภาคจะได้รับความเค้นมากขึ้นส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น จึงแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วหัวกดที่สูงขึ้นผลจากการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกบนผนังโพรงอากาศจะมีอิทธิพลมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ขนาดของโพรงอากาศน่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งเพราะโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินามีขนาดโพรงอากาศเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมชนิดอื่นซึ่งจะมีพื้นที่ให้แก๊สไหลผ่านได้ยากและมีจำนวนโพรงอากาศมากกว่าจึงน่าจะช่วยให้เพิ่มความเค้นรวมและการดูดซับพลังงาน แต่กลับมีค่าไม่ต่างกันอาจเนื่องมาจากรูปร่างของโพรงอากาศซึ่งมีอิทธิพลด้วยเช่นกัน โดยโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินามีโพรงอากาศที่มี



ความกลมต่ำที่สุดซึ่งในขณะที่รับแรงอัดตามมุมของโพรงอากาศที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูง จะเกิดความเสียหายได้ง่ายและยังเป็นจุดบกพร่องซึ่งแก๊สสามารถไหลผ่านออกไปได้ง่ายทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดต่ำลง

- โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่มีการกระจายตัวของอนุภาคบนผนังโพรงอากาศดี ที่สุด ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นความแตกต่างหลังจากเพิ่มความเร็วหัวกด ได้ชัดเจนที่สุดเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกด (เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.19 กับ 4.20) แม้ว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกามีโพรงอากาศที่ค่อนข้างใหญ่และมีรูปร่างของโพรงอากาศที่มีความกลมต่ำก็ตาม น่าจะเป็นเพราะอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันจะเป็นจุดเริ่มของการแตกหักได้ง่าย จึงไม่ช่วยรับแรงอัดและดูดซับพลังงานเท่าที่ควร ประกอบกับเมื่อพิจารณารูปที่ 4.33 พบว่า โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกด เป็น 50 mm/min จะมีการดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้นแต่ยังน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ตารางที่ 4.1) อีกทั้งยังสามารถเพิ่มการดูดซับพลังงานได้สูงสุดที่ 1 wt.% เท่านั้น อาจเป็นเพราะความสามารถในการเปียกที่น้อยที่สุด (มุมสัมผัสเท่ากับ  $140^{\circ}$ ) ซึ่งอนุภาคเซรามิกมีบทบาทในการดูดซับพลังงานมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดมากขึ้นดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น ดังนั้นในกรณีนี้จึงเห็นได้ว่าความสามารถในการเปียกและการกระจายตัวน่าจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด

- โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เมื่อมีการเพิ่มความเร็วหัวกดดังรูปที่ 4.35 พบว่า มีการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นปริมาณเท่าใดก็ตาม น่าจะเป็นเพราะแม้จะเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุด แต่มีการกระจายตัวของอนุภาคบนผนังโพรงอากาศค่อนข้างดี (รูปที่ 4.10) ประกอบกับความสามารถในการเปียกที่ค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นเป็นรองเพียงอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ยังมีโพรงอากาศที่ค่อนข้างกลมจึงยังสามารถช่วยรับแรงอัดและดูดซับพลังงาน แม้ว่าจะมีโพรงอากาศเฉลี่ยค่อนข้างใหญ่ก็ตาม

- โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์เมื่อมีการเพิ่มความเร็วหัวกดดังรูปที่ 4.37 พบว่ามีการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ และเพิ่มมากกว่าอย่างชัดเจน อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.16, 4.20, 4.24 และ 4.28 แสดงให้เห็นว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีค่าความเค้นรวมเพิ่มขึ้นมากที่สุด เพราะขนาดของอนุภาคที่เล็กที่สุดและมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างดีรวมไปถึงมีโพรงอากาศที่มีลักษณะกลมที่สุด แม้ว่าจะมีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยสูงที่สุดก็ตาม ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่จะช่วยรับและกระจายแรงอัด ส่วนโพรงอากาศจะช่วยดูดซับพลังงานอีกทางหนึ่งซึ่งโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์มีโพรงอากาศที่มีความกลมที่สุด โดยโพรงอากาศที่มีลักษณะกลมกว่าจะมีจุดที่ง่ายต่อการแตกหักจากความเข้มข้นของความเค้นน้อยกว่า จึงสามารถดูดซับพลังงานได้ค่อนข้างดี

### 5.3.2 ในกรณีที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อ

สำหรับการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อความเค้นรวมที่ได้จะค่อนข้างใกล้เคียงกัน น่าจะมาจากการไหลของความเค้นนอกจากจะไปสะสมบริเวณโดยรอบอนุภาคเซรามิกจนทำให้เกิดความร้อนและอ่อนตัวลงของโฟมอะลูมิเนียมแล้ว ในบริเวณรอยหยักของท่อก็จะมีผลกระทบของความเค้นที่สูงเช่นกันแต่ท่อจะเป็นตัวช่วยรับแรงอีกทางหนึ่ง ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดแรงที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นภาระของอนุภาคเซรามิกอย่างเดียวแต่ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าจะช่วยรับแรงอัดด้วย อาจด้วยเหตุนี้ความเค้นรวมของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อที่มีความเร็วหัวกด 50 mm/min จึงมีค่าใกล้เคียงกับที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min หรือแตกต่างกันไม่เกิน 10% แต่ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min ยังสังเกตเห็นความเค้นรวมมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ได้ชัดเจนกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ดังตัวอย่างที่เปรียบเทียบจากรูปที่ 4.17 กับ 4.18 รวมทั้งจากผลการทดลองของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ยังมีการดูดซับพลังงานสูงกว่าที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.38 ตรงข้ามกับโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาใส่ท่อซึ่งที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานสูงกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ดังรูปที่ 4.32 อาจเนื่องมาจากขณะที่โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อได้รับแรงอัด แก๊สที่อยู่ภายในโพรงอากาศจะถูกอัดเมื่อโพรงอากาศเริ่มยุบตัวจากแรงอัดอีกทั้งยังได้รับแรงอัดทางด้านข้างจากท่อด้วยทำให้อากาศอยู่ในโฟมอะลูมิเนียมค่อนข้างมากเนื่องจากทางออกของแก๊สส่วนใหญ่ถูกปิด ดังนั้นโพรงอากาศที่มีความกลมมากกว่าเช่นในโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อทำให้มีบริเวณที่แก๊สสามารถไหลออกจากโฟมอะลูมิเนียมบริเวณมุมของโพรงอากาศน้อยเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดจึงไม่ต้องคำนึงถึงผลของการไหลของแก๊สออกจากโฟมอะลูมิเนียม ต่างจากโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาใส่ท่อซึ่งมีความกลมของโพรงอากาศต่ำซึ่งจะมีมุมของโพรงอากาศทำให้แก๊สสามารถไหลออกจากโฟมอะลูมิเนียมได้ง่ายกว่า เพราะฉะนั้นที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าในการรับแรงอัดทำให้แก๊สมีเวลาไม่มากในการไหลออกจากโฟมอะลูมิเนียม ด้วยเหตุนี้โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกใส่ท่อที่มีโพรงอากาศกลมกว่าจึงมีการดูดซับพลังงานไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อมีความเร็วหัวกดที่สูงขึ้น สำหรับกรณีอื่นๆซึ่งมีขนาดโพรงอากาศเล็กกว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อแต่ใหญ่กว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาใส่ท่อ โดยที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min จะมีการดูดซับพลังงานในช่วงที่มีปริมาณอนุภาคเซรามิก 0 wt.% ถึง 3 wt.% ดีกว่าในช่วงที่มีปริมาณอนุภาคเซรามิก 3 wt.% ถึง 5 wt.% หลังจากนั้นที่ความเร็วหัวกด

50 mm/min จะมีการดูดซับพลังงานมากกว่า อาจเป็นเพราะขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนักเท่ากันจึงมีความกลมน้อยกว่า ส่งผลให้ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีการดูดซับพลังงานที่ดีกว่า

นอกจากนี้การไหลของความเค้นที่มากขึ้นอาจส่งผลให้มีความเข้มข้นของความเค้นโดยรอบอนุภาคเซรามิกมากขึ้นจนทำให้เกิดความร้อนและอ่อนตัวลงของโพลีเอทิลีน ส่วนในบริเวณรอยหยักของท่อจะมีความเข้มข้นของความเค้นที่สูงเช่นกันแต่ท่อจะเป็นตัวช่วยดูดซับพลังงานอีกทางหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วหัวกดจะทำให้แรงที่เกิดขึ้นไม่เป็นภาระของอนุภาคเซรามิกอย่างเดียวแต่ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมจะช่วยดูดซับพลังงานด้วย

#### 5.4 แบบจำลองการดูดซับพลังงานเบื้องต้น

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.5 กรณีของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคเซรามิกที่ไม่ใส่ท่อพบว่า ค่าการดูดซับพลังงานจากแบบจำลองเมื่อเทียบกับความเร็วหัวกดเดียวกันแล้วจะมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองจริงทั้งสิ้นไม่ว่าจะเติมอนุภาคเซรามิกชนิดใดลงไปก็ตามและค่าที่ได้จากแบบจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดถึง 36% เพราะจากผลการทดลองเพื่อใช้คำนวณหาแบบจำลองในส่วนของ การเพิ่มความแข็งเนื่องจากความเครียดได้ทำการหาสมการแนวโน้มจากสมการกำลัง (Power equation) ซึ่งโดยทั่วไปใช้คำนวณกับวัสดุที่ไม่มีรูพรุน ทั้งนี้วัสดุที่มีรูพรุนจะมีการบีบอัดโพรงอากาศจากโพรงอากาศที่อ่อนแอที่สุดไปเรื่อยๆตามลำดับจนหมดทำให้สมการแนวโน้มที่ได้ต่างออกไปจากสมการกำลัง นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min เล็กน้อยเนื่องจากค่าที่วัดได้จากความเร็วหัวกดที่มากกว่าจะมีจำนวนข้อมูลของความเค้นต่อระยะความเครียดน้อยกว่าจึงทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนพอสมควร

ในกรณีที่นำโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคเซรามิกมาใส่ท่อแล้วนำมาเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่าการดูดซับพลังงานระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองพบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงค่าที่วัดได้จริงมากกว่าโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคเซรามิกโดยไม่ใส่ท่อเพราะค่าที่คลาดเคลื่อนจากโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคเซรามิกไม่ใส่ท่อส่งผลน้อยลงเนื่องมาจากค่าอันตรกิริยาที่มากกว่าของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคเซรามิกมาใส่ท่อ และค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จริงมากที่สุดประมาณ 17% ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการประมาณค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองหลายค่าในสมการแบบจำลองซึ่งค่าที่ใช้แทนในสมการหรือหาเป็นค่าคงที่ส่วนใหญ่มาจากสมการแนวโน้มหรือค่าเฉลี่ยซึ่งอาจมีความแม่นยำไม่มากเท่าที่ควร ทั้งนี้หากตัวแปรที่ใช้แทนในสมการมีค่ามากกว่าในงานวิจัยนี้คาดว่า

ความคลาดเคลื่อนน่าจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากตัวแปรและค่าต่างๆที่ได้ไม่ครอบคลุมเป็นเพียงแนวโน้มนั้นซึ่งยังคงมีปัจจัยอื่นๆที่ต้องพิจารณาอีกเช่น ความหนืดเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค เซรามิกมากขึ้น แรงตึงผิว ความสามารถในการเปียกของอนุภาค รวมทั้งผลของขนาดและรูปร่าง โพรงอากาศ เป็นต้น

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของชนิดและปริมาณอนุภาคเซรามิก รวมทั้งความเร็วหัวกดที่มีต่อความแข็งแรงอัด และการดูดซับพลังงานของท่อที่ใส่โพลีเอทิลีนที่เสริมอนุภาคเซรามิก ทำให้สามารถนำค่าและความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดลองไปพัฒนาแบบจำลองการดูดซับพลังงานเบื้องต้นได้

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลของการเติมอนุภาคเซรามิกลงในโพลีเอทิลีนที่ใส่ท่อต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปื่อยและการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกที่แตกต่างกันเป็นหลัก

2. เมื่อนำโพลีเอทิลีนที่เสริมอนุภาคเซรามิกไปใส่ท่อจะส่งผลต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานชัดเจนขึ้น ซึ่งโพลีเอทิลีนที่เติมอนุภาคเซรามิกจะมีค่าความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นโดยรวมประมาณ 5 ถึง 10% เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันของอนุภาคเซรามิก

3. ผลของการเติมอนุภาคเซรามิกในปริมาณมากขึ้นลงในโพลีเอทิลีนที่ใส่ท่อต่อความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานขึ้นอยู่กับขนาดของโพรงอากาศเฉลี่ยเป็นหลัก

4. ในกรณีที่นำโพลีเอทิลีนที่เสริมอนุภาคเซรามิกไปใส่ท่อ ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคเซรามิกมากขึ้น โดยที่ปริมาณอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ 5 wt.% สามารถเพิ่มได้ถึง 32% โดยประมาณ

5. สำหรับโพลีเอทิลีนที่เสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ไม่ใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min จะมีความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานมากกว่าที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ประมาณ 33%

6. ในกรณีที่นำโพลีเอทิลีนที่เสริมอนุภาคเซรามิกไปใส่ท่อพบว่า ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากท่อจะช่วยในการรับและดูดซับพลังงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความกลมของโพรงอากาศด้วย

7. เมื่อเติมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ปริมาณ 5 wt.% ลงในโพลีเอทิลีนที่นำไปใส่ท่อแล้วรับแรงที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น

จากโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงที่สุดในผลการทดลองทั้งหมดประมาณ 45% เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดและมีค่าความกลมของโพรงอากาศสูงที่สุด

8. เมื่อเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 wt.% ลงในโพลีอะลูมิเนียมที่นำไปใส่ท่อแล้วรับแรงที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นจากโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เพียง 16% เท่านั้น ซึ่งต่ำที่สุดในผลการทดลองทั้งหมด เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคอะลูมินาที่ไม่มีการเกาะกลุ่มกันและอนุภาคเซรามิกชนิดอื่น

9. เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดลองจริงกับที่ได้จากแบบจำลองพบว่า โพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกที่ใส่ท่อ มีค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงค่าที่วัดได้จริงมากกว่าโพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกโดยไม่ใส่ท่อ

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยนี้พบว่า การดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคเซรามิกในท่อเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับปัจจัยในหลายๆด้าน ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ไม่ได้นำมาพิจารณา เช่น ความหนืดของอะลูมิเนียมเหลวเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคเซรามิก ความหยาบของผิวอนุภาคเซรามิก บรรยากาศในเตาที่ใช้ในการผลิตโพลีอะลูมิเนียม และปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคเซรามิกกับอะลูมิเนียมเนื้อพื้น รวมทั้งข้อจำกัดทางด้านการผลิตซ้ำ (Reproducible) ของโพลีอะลูมิเนียมที่ได้ค่อนข้างยาก โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีความหนาแน่นระหว่าง 0.56 ถึง 0.65 g/cm<sup>3</sup> สำหรับกรณีของแบบจำลองเบื้องต้นเช่นกัน ยังต้องการปัจจัยที่จะนำมาพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น เช่น รูปร่างหน้าตัดชิ้นงาน ความหนาของท่อ และค่าความดันกับบรรยากาศภายในเตาระหว่างการผลิต เป็นต้น การศึกษาวิจัยนี้จึงเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งก็พอเพียงสำหรับการให้ความรู้พื้นฐานแก่ผู้ที่สนใจเกี่ยวกับผลของอนุภาคเซรามิกที่มีต่อความแข็งแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียมในท่อ

ดังนั้นผู้ที่สนใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียม สามารถกำหนดปัจจัยต่างๆเพิ่มเติม และทำการทดลองโดยใช้ข้อมูลที่มากและครอบคลุมยิ่งขึ้น รวมทั้งหากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีสมบัติใกล้เคียงกันได้มากยิ่งขึ้น น่าจะทำให้สามารถหาแนวโน้มและความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ใกล้เคียงกระบวนการจริงมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถพัฒนาแบบจำลองเพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## รายการอ้างอิง

- [1] Banhart, J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foam. Progress in Materials Science 46 (2001) : 559-632.
- [2] Wadley, Haydn.N.G. Cellular Metals Manufacturing. Advance Engineering Materials 4 (2002) : 726-733.
- [3] Asavavisitchai, S. Production of Aluminium Foam by Power Metallurgical Route. Nottingham : 2001. (Unpublished Manuscript)
- [4] Ashby, M.F., Evan, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and Wadley, H.N. Metal foams: a design guide. U.S.A : Butterworth-Heinemann, 2000.
- [5] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. Cellular solids: structure and properties. 2 ed. UK : Cambridge University Press, 1997.
- [6] Simansik, F., Rajner, W., and Laag, R. Alulight-aluminium foam for lightweight construction. SAE Technical Paper (2000-01) : 0337.
- [7] Kennedy, A. R., and Asavavisitchai, S. Foaming of compacted Al-TiH<sub>2</sub>. Materials Science Forum 396-402 (2002) : 251-258.
- [8] Kennedy, A. R. The effect of compaction on expansion and gas release in Al-TiH<sub>2</sub> powder compacts. Third International Latin-America Conference on Powder Technology 3 (11 /2001).
- [9] Baumgartner, F., Duarte, I., and Banhart, J. Adv. Eng. Mat. 2 (2000) : 168.
- [10] Baumeister, J. German Patent DE 40 18 360 (1990)
- [11] Banhart, J. Europhys News 30 (1999) : 17.
- [12] Babcsan, N., Leitlmeier, D., and Degischer, H. P. Foamability of Particle Reinforced Aluminium Melt. Mat.-wiss. U. Werkstofftech. 34 (2003) : 22-29.
- [13] Gergely, V., Degischer, H. P., and Clyne, T. W. Recycling of MMCs and production of metallic foams. : 1-24.
- [14] Ip, S.W., Wang, Y., and Toguri, J.M. Aluminium foam stabilization by solid particles. Canadian Metallurgical Quarterly 38 (1999) : 81-92.
- [15] Banhart, J. Manufacturing Routes for Metallic Foams. JOM 52 (12) (2000) : 22-27.
- [16] Deqing, W., and Ziyuan, S. Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam. Materials Science and Engineering A361 (2003) : 45-49.
- [17] เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร. วัสดุผสม 1. กรุงเทพมหานคร , 2546. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

- [18] Huko, B., Faria, L. Material model of metallic cellular solids. Computers and structure 62, 2 (1997) : 1049-1057.
- [19] Markaki, A.E., and Clyne, T.W. The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams. Acta Materialia 49, 9 (2001) : 1677-1686.
- [20] Bin, W., Deping, H., and Guangji, S. Compressive properties and energy absorption of foamed Al alloy. Proceeding of the International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology 2 (2001).
- [21] Han, F., Zhu, Z.G., and Gao, J. Compressive deformation and energy absorbing characteristic of foamed aluminium. Metallurgical and Materials Transactions A 29A (1998) : 2497-2502.
- [22] Gibson, L.J. Mechanical Behavior of Matallic Foams. Journal of Materials Science 30 (2000) : 191-227.
- [23] Deqing, W., Weiwei, X., Xianjun, M., and Ziyuan. S. Cell structure and compressive behavior of an aluminium foam. Journal of Materials Science 40 (2005) : 3475-3480.
- [24] Kenesei, P., Kadar, Cs., Rajkovits, Zs., and Lendvai, J. The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams. Scripta Materialia 50 (2004) : 295-300.
- [25] Quadbeck, P., Kaschta, J., and Singer, F.S. Superalloy IN625 with Cellular Microstructure- Fabrication Route and Mechanical Properties. Advanced Engineering Materials 6, 8 (2004) : 635-639.
- [26] Banhart, J., and Baumeister, J. Deformation characteristics of metal foams. Journal of Materials Science 33 (1998) : 1431-1440.
- [27] Paul, A., and Ramamurty, U. Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminium foam. Materials Science and Engineering A281 (2000) : 1-7.
- [28] Available from: <http://www.iwu.fraunhofer.de> [2008, April 10]
- [29] Bastawros, A-F., Bart-Smith, H., and Evans, A.G. Experimental analysis of deformation mechanisms in a close-cell aluminum alloy foam. Journal of the Mechanics and physics of Solids 48 (2000) : 301-322.
- [30] Li, Y., and Ramesh, K.T. Influence of particle volume fraction, shape, and aspect ratio on behavior of particle-reinforced metal-matrix composites at high rates of strain. Acta Materials 46, No. 16 (1998) : 5633-5646.



- [31] Tan, Z.H., Pang, B.J., Gai, B.Z., Wu, G.H., and Jia, B. The dynamic mechanical response of SiC particulate reinforced 2024 aluminum matrix composites. Materials Letters 61 (2007) : 4606-4609.
- [32] Varma, V.K., Kamat, S.V., Mahajan, Y.R., and Kutumbarao, V.V. Effect of reinforcement size on low strain yielding behaviour in Al-Cu-Mg/SiC<sub>p</sub> composites. Materials Science and Engineering A318 (2001) : 57-64.
- [33] Clyne, T.W., and Withers, P.J. An Introduction to Metal Matrix Composites. UK : Cambridge University Press, 1993.
- [34] Prangnell, P.B., Barnes, S.J., Roberts, S.M., and Withers, P.J. The effect of particle distribution on damage formation in particulate reinforced metal matrix composites deformed in compression. Materials Science and Engineering A220 (1996) : 41-56.
- [35] Nakae, H., Inui, R., Hirata, Y., and Saito, H. Effect of surface roughness on wettability. Acta Materials 46, 7 (1998) : 2313-2318.
- [36] Guillo, S.R., Lu, G., and Grzebieta, R.H. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. International Journal of Mechanical Science 43 (2001) : 2103-2123
- [37] Bardi, F.C., and Kyriakides, S. Plastic buckling of circular tubes under axial compression- part 1: Experiments. International Journal of Mechanical Science 48 (2006) : 830-841
- [38] Alexander, J.M. An approximate analysis of collapse of thin-walled cylindrical shells under axial loading. Journal of Mechanical and Applied Mathematics 13 (1960) : 10-5.
- [39] Grzebieta, R.H.. An alternative method for determining the behaviour of round stocky tubes subjected to axial crush loads. Thin-Walled Structure 9 (1990) : 66-89.
- [40] Abramowicz, W., and Jones, N. Dynamic axial crushing of circular tubes. International Journal of Impact Engineering 2 (1984) : 263-81.
- [41] Ashby, M.F. Materials Selection in Mechanical Design. U.S.A : Butterworth-Heinemann, 1999.
- [42] Hassen, A.G., Langseth, M., and Hopperstad, O.S. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. International Journal of Impact Engineering 24 (2000) : 475-507.
- [43] Seitzberger, M., Rammerstorfer, G., and Degischer, H.P. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. Acta Mechanica 125 (1997) : 93-105.

- [44] Dannemann, K.A., and Langford, J.Jr. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams. Mechanical Science and Engineering A293 (2000) : 157-164.
- [45] Ruan, D., Lu, G., Chen, F.L., and Siores, E. Compressive behaviour of aluminium foams at low and medium strain rates. Composite Structures 57 (2002) : 331-336.
- [46] Asavavisithchai, S., Slater, D., and Kennedy, A.R. Effect of tube length on the buckling mode and energy absorption of Al foam-filled tubes. Journal of Materials Science 39 (2004) : 7395-7396.
- [47] Asavavisithchai, S., Slater, D., and Kennedy, A.R. bonding strength on the energy absorption of Al foam-filled cylindrical tube. Journal of Materials Science 39 (2004) : 5873-5875.
- [48] Abramowicz, W., and Wierzbicki, T. Axial crushing of foam-filled columns. Journal of Materials Science 30, 3/4 (1988) : 263-271.
- [49] Gupta, N.K., and Venkatesh. A study of the influence of diameter and wall thickness of cylindrical tubes on their axial collapse. Thin-Walled Structures 44 (2006) : 290-300.
- [50] Seizberger, M., Rammerstorfer, Grading, R., Degischer, H.P., Blaimschein, M., and Walch, C. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam. International Journal of Solids Structure 37 (2000) : 4125-4147.
- [51] Hashim, J., Looney, L., and Hashmi, M.S.J. The wettability of SiC particles by molten aluminium alloy. Journal of Materials Processing Technology 119 (2001) : 324-328.
- [52] Xie, L., Rielly, C.D., Eagles, W., and Ozcan-Taskin, G. Dispersion of nano-particle clusters using mixed flow and high shear impellers in stirred tanks. Chemical Engineering Research and design 85(A5) (2007) : 676-684.
- [53] Sangghaleh. A., and Halali, M. An investigation on the wetting of polycrystalline alumina by aluminium. Journal of Materials Processing Technology 197 (2008) : 156-160.
- [54] Laurent, V., Chatain, D., and Eustathopoulos, N. Wettability of SiO<sub>2</sub> and oxidized SiC by aluminium. Materials Science and Engineering A135 (1991) : 89-94.
- [55] Tian, J., Pinero, E., Narciso, J., and Louis, E. Effect of temperature on pressure infiltration of liquid Al and Al-12wt.%Si alloy into packed SiC particles. Scripta Materialia 53 (2005) : 1483-1488.
- [56] Contreras, A. Wetting of TiC by Al-Cu alloys and interfacial characterization. Journal of Colloid and Interface Science 311 (2007) : 159-170.
- [57] Banhart, J. Metal Foams: Production and Stability. Advanced Engineering Materials 8 No.9 (2006) : 781-794.

- [58] Tirtom, I., Guden, M., and Yildiz, H. Simulation of strain rate sensitive flow behavior of SiC-particulate reinforced aluminum metal matrix composites. Computational Materials Science (2007).
- [59] Tan, Z.H., Pang, B.J., Qin, D.T., Shi, J.Y., and Gai, B.Z. The compressive properties of 2024Al matrix composites reinforced with high content SiC particles at various strain rates. Materials Science and Engineering A (2008).

**ภาคผนวก**

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

1. หลังจากผลิตชิ้นงาน โฟมอะลูมิเนียมแล้ว นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง จากนั้นนำชิ้นงานไปทาวาสลินให้ทั่วเพื่อป้องกันน้ำเข้าไปในชิ้นงาน โฟมอะลูมิเนียมในขณะที่ชั่งน้ำหนักในน้ำ เมื่อชั่งน้ำหนักทั้งในอากาศและในน้ำเรียบร้อยแล้วจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงาน โฟมอะลูมิเนียมดังสมการด้านล่างนี้

$$\rho_{foam} = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times \rho_{water} \quad (1ก)$$

โดยกำหนดให้  $W_{air}$  และ  $W_{water}$  แทนน้ำหนักของโฟมอะลูมิเนียมในอากาศและในน้ำ (กรัม) ตามลำดับ สำหรับ  $\rho_{water}$  แทนความหนาแน่นของน้ำซึ่งมีค่า  $1 \text{ g/cm}^3$

2. เมื่อได้ค่าความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมจะสามารถหาปริมาตรได้จากสมการ

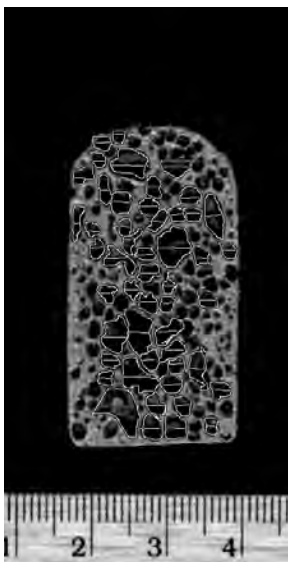
$$V_{foam} = \frac{W_{air}}{\rho_{foam}} \quad (2ก)$$

เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ  $1 \text{ g/cm}^3$  จึงสามารถแทนค่า  $V_{foam} = W_{air} - W_{water}$  ลงไปได้เลย จากนั้นจึงนำมาแทนค่าในสมการ 3ก เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

$$\% \text{ expansion} = \left[ \frac{V_{foam} - V_{precursor}}{V_{precursor}} \right] \times 100 \quad (3ก)$$

## ภาคผนวก ข

### การหาขนาดและความเป็นวงกลมของโพรงอากาศ



รูปที่ 1ข แสดงการวัดขนาดและเส้นรอบวงของโพรงอากาศ (โพรงอากาศที่แสดงให้เห็นว่าถูกวัด เป็นเพียงตัวอย่างเท่านั้น ไม่ได้ครอบคลุมทุกโพรงอากาศในโฟม)

จากรูปที่ 1ข แสดงตัวอย่างวิธีการวัดขนาดโพรงอากาศแต่ละโพรงโดยใช้วิธีการวัดแบบ average Feret's diameter ( $F_{av}$ ) ซึ่งทำได้โดยการหาความยาวเส้นรอบรูปจากโปรแกรม Motic Images Plus 2.0 แล้วนำไปแทนในสมการ

$$F_{av} = \frac{P}{\pi} \quad (1ข)$$

โดย P แทนความยาวเส้นรอบรูป จากนั้นใช้วิธีการวัดแบบ Martin's diameter (M) ซึ่งเป็นการวัดความยาวเส้นที่แบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วนโดยใช้ทิศทางเดียวกันทั้งหมด นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ 1ข เพื่อหาความเป็นวงกลมของโพรงอากาศแต่ละโพรง

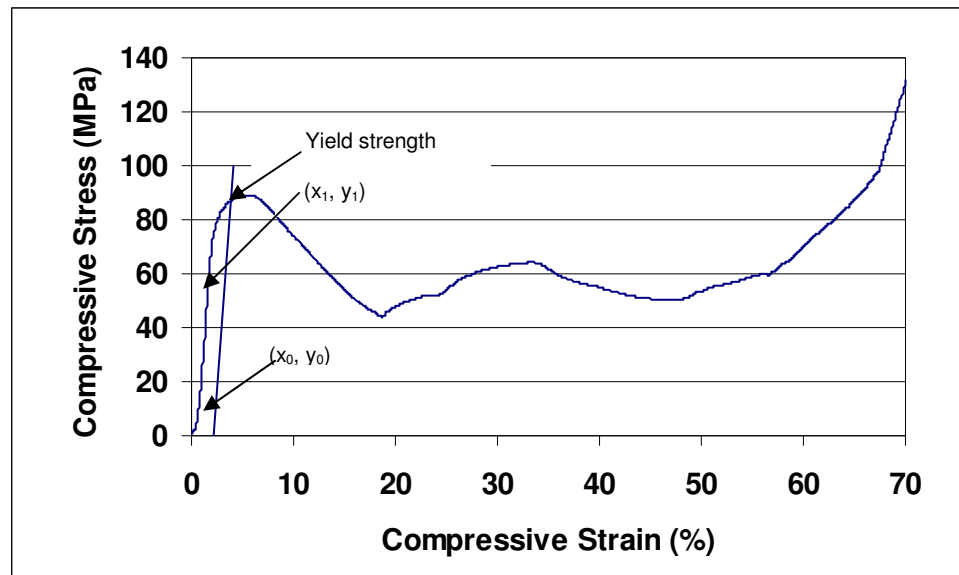
$$\frac{F_{av}}{M} = \text{Circularity} \quad (2ข)$$

ซึ่งค่าที่ได้หากมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าเป็นวงกลม แต่ถ้าค่าที่ได้ยิ่งห่างจาก 1 มากเท่าใดก็ยิ่งมีลักษณะใกล้เคียงรูปร่างเข็ม (Acicular) มากเท่านั้น

## ภาคผนวก ก

### วิธีการหาค่าเพื่อใช้แทนในแบบจำลอง

#### 1. การหาค่าความเค้นจุดคราก ( $\sigma_{ys}$ )



รูปที่ 1ค แสดงตัวอย่างวิธีการหาความเค้นจุดคราก

จากรูปที่ 1ค ขั้นตอนแรกต้องหาสมการของกราฟบริเวณก่อนที่จะถึงความเค้นจุดครากที่มีความเครียด 0.2% โดยการหาค่าแทนของจุดสองจุดที่อยู่บนเส้นจากนั้นนำมาลบกันดังนี้

$$(x_1 - x_0, y_1 - y_0) = (x_2, y_2) \quad (1ค)$$

เมื่อนำ  $y_2$  มาหารด้วย  $x_2$  จะให้ความชันของสมการซึ่งแทนได้ว่า

$$y = \left( \frac{y_2}{x_2} \right) x + C \quad (2ค)$$

แทนค่า  $y$  ให้มากกว่าจุดสูงสุดจุดแรกดังรูปด้านบนแทนด้วย 100 และแทน  $C$  ด้วยค่าจุดตัดแกน  $y$  จากนั้นจะได้ค่า  $x$  ซึ่งนำไปสร้างสมการเส้นตรงเพื่อหาจุดตัดกราฟโดยใช้จุด  $(0.2, 0)$  และ  $(x+0.2, y)$  ในการสร้าง ทั้งนี้ที่จุดตัดคือค่าความเค้นจุดครากที่นำมาใช้นั่นเอง

## 2. การหาค่าความเค้นจุดครากของแข็ง ( $\sigma_s$ )

เมื่อหาค่าความเค้นจุดครากของโพลีอะลูมิเนียมได้แล้ว จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการ (3ค) เพื่อหาค่า  $\sigma_s$  [4] ได้ว่า

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{ys}}{C_1 \left[ 0.5 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{2}{3}} + 0.3 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \right]} \quad (3ค)$$

โดยให้  $C_1 \approx 0.3$  และเนื่องจาก  $\rho_s$  มีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณอนุภาคเซรามิกที่เติมลงไปซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

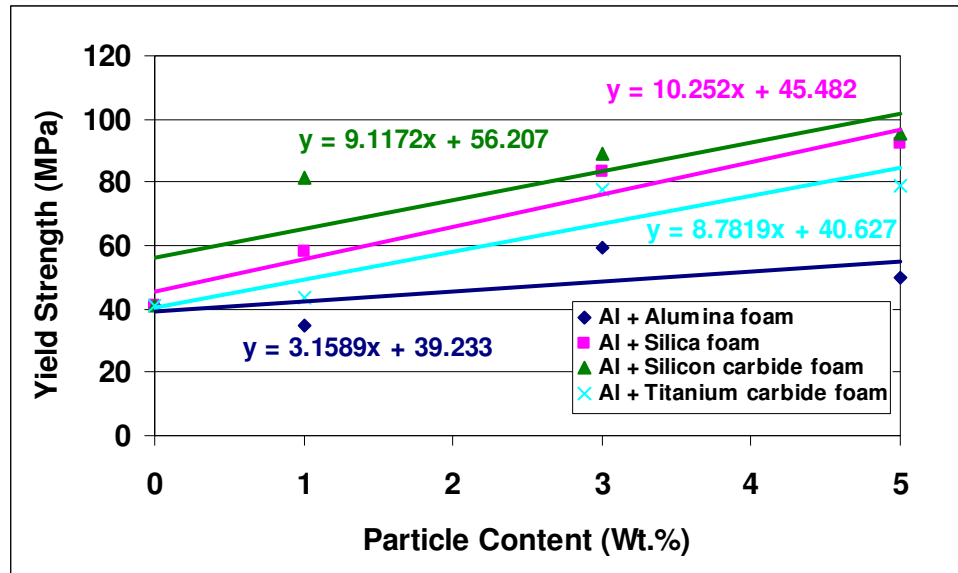
$$v_s = \left( \frac{m - \frac{mx}{100}}{\rho_{Al}} \right) + \left( \frac{\frac{mx}{100}}{\rho_c} \right) \quad (4ค)$$

นำค่า  $v_s$  ซึ่งแทนค่าปริมาตรรวมของแข็งที่ได้จากสมการ (4ค) มาแทนในสมการ (3ค) ได้ว่า

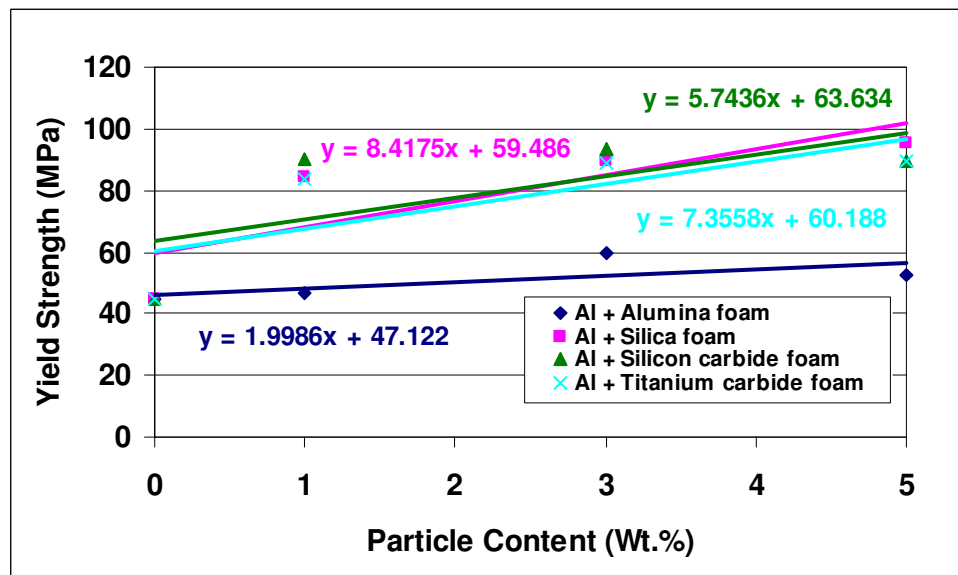
$$\rho_s = \frac{m}{v_s} \quad (5ค)$$

โดยกำหนดให้  $m$  คือน้ำหนักรวมของ precursor ส่วน  $x$  คือปริมาณอนุภาค (%) โดยน้ำหนัก และ  $\rho_c$  คือความหนาแน่นของอนุภาคเซรามิกที่เติมเข้าไป จากนั้นเพื่อนำค่า  $\sigma_s$  มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคเซรามิกจึงต้องนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟและหาสมการแนวโน้มดังรูปที่ (2ค) และ (3ค)



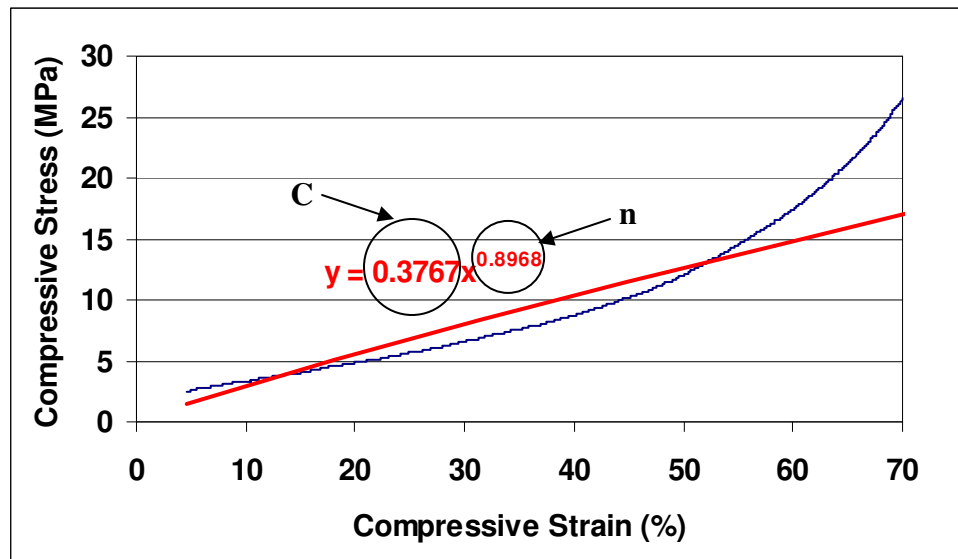


รูปที่ 2ค แสดงความเค้นจุดครากที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min



รูปที่ 3ค แสดงความเค้นจุดครากที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

### 3. การหาสมการกำลังในส่วนของ Strain hardening



รูปที่ 4ค แสดงการหาสมการกำลังจากช่วง Strain hardening

จากรูปที่ (4ค) เนื่องจากไม่สามารถหาสมการที่แท้จริงในช่วงนี้ได้จึงทำการประมาณโดยสร้างสมการกำลังซึ่งค่าที่ได้จากกราฟจะทำการหาค่าเฉลี่ยอีกที่ดังตารางที่ (1ค) ส่วนสมการที่ได้ต้องทำการอินทิเกรตเพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟได้ว่า

$$C \frac{(\varepsilon)^{n+1}}{(n+1)} = (E.A.)_{sh} \quad (6ค)$$

ซึ่งการแทนค่า  $\varepsilon$  จะแทนด้วยค่าที่เป็นสัดส่วนจาก 100 แล้ว เช่น 70% จะแทนด้วย 0.7 และการหาพื้นที่ใต้กราฟก็เช่นกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสมการให้เหมาะสมต่อการแทนค่าเพื่อให้ค่าที่ได้ออกมาถูกต้องดังสมการด้านล่างนี้

$$C \frac{(100\varepsilon)^{n+1}}{100(n+1)} = (E.A.)_{sh} \quad (7ค)$$

ตารางที่ 1ค แสดงค่าคงที่ที่ได้จากเส้นแนวโน้มสมการกำลัง

ชนิดโฟม ปริมาณอนุภาค	Al + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam at cross head rate 5 mm/min		Al + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam at cross head rate 50 mm/min		Al + SiO <sub>2</sub> foam at cross head rate 5 mm/min		Al + SiO <sub>2</sub> foam at cross head rate 50 mm/min		Al + SiC foam at cross head rate 5 mm/min		Al + SiC foam at cross head rate 50 mm/min		Al + TiC foam at cross head rate 5 mm/min		Al + TiC foam at cross head rate 50 mm/min	
	C	n	C	n	C	n	C	n	C	n	C	n	C	n	C	n
0 wt.%	0.96	0.68	0.69	0.79	0.96	0.68	0.69	0.79	0.96	0.68	0.69	0.79	0.96	0.68	0.69	0.79
1 wt.%	0.38	0.90	0.37	0.90	0.71	0.76	1.73	0.59	1.14	0.62	2.67	0.42	0.83	0.70	0.62	0.83
3 wt.%	0.82	0.72	0.98	0.67	1.36	0.65	1.86	0.55	1.07	0.64	2.15	0.49	2.09	0.48	2.00	0.54
5 wt.%	1.12	0.63	1.00	0.67	0.57	0.77	1.35	0.65	0.30	1.02	0.77	0.78	0.50	0.85	0.58	0.86
ค่าเฉลี่ย	0.82	0.73	0.76	0.76	0.90	0.71	1.41	0.65	0.87	0.74	1.57	0.62	1.10	0.68	0.97	0.76

#### 4. การหาสมการการดูดซับพลังงานของท่อ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 และใช้ขนาดเท่ากันทั้งหมด ดังนั้นการดูดซับพลังงานในส่วนนี้จึงมีค่าเท่ากันทั้งหมด โดยสามารถหาได้จากการแทนค่าการทดลองจริงลงในสมการ (8ค) เพื่อหาค่า  $C_2$

$$C_2 \sigma_s \varepsilon = (E.A.)_{tube} \quad (8ค)$$

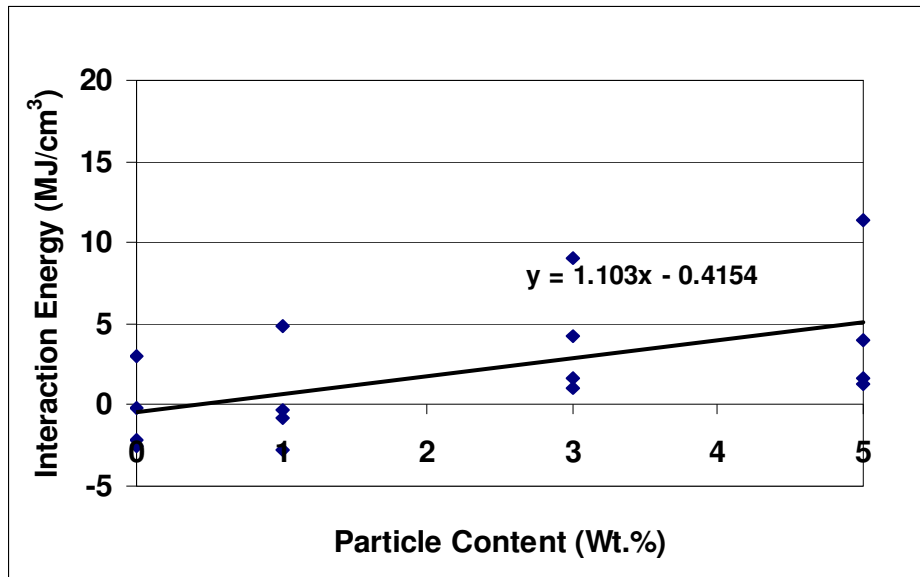
เมื่อแทนค่า  $\sigma_s$  ซึ่งเป็นค่าความเค้นจุดครากของเหล็กกล้าไร้สนิมเท่ากับ 215 MPa และ  $\varepsilon$  เท่ากับ 70/100 หรือ 0.7 ซึ่งเป็นค่าความเครียดสูงสุดในงานวิจัยนี้ รวมทั้ง  $(E.A.)_{tube}$  เท่ากับ 27.57 MJ/cm<sup>3</sup> ซึ่งเป็นค่าการดูดซับพลังงานของท่อลงไปจะได้ว่า

$$C_2 = \frac{27.57}{215 \times 0.7} = 0.183 \quad (9ค)$$

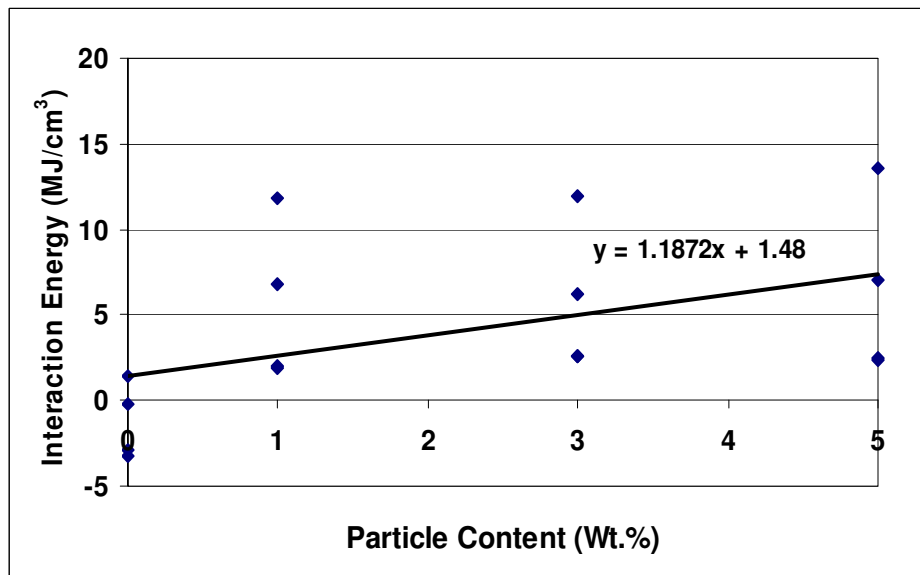
จากนั้นนำค่า  $C_2$  ที่ได้ไปแทนในสมการ (8ค) จึงได้สมการที่ 4.6

5. การหาค่าอันตรกิริยา

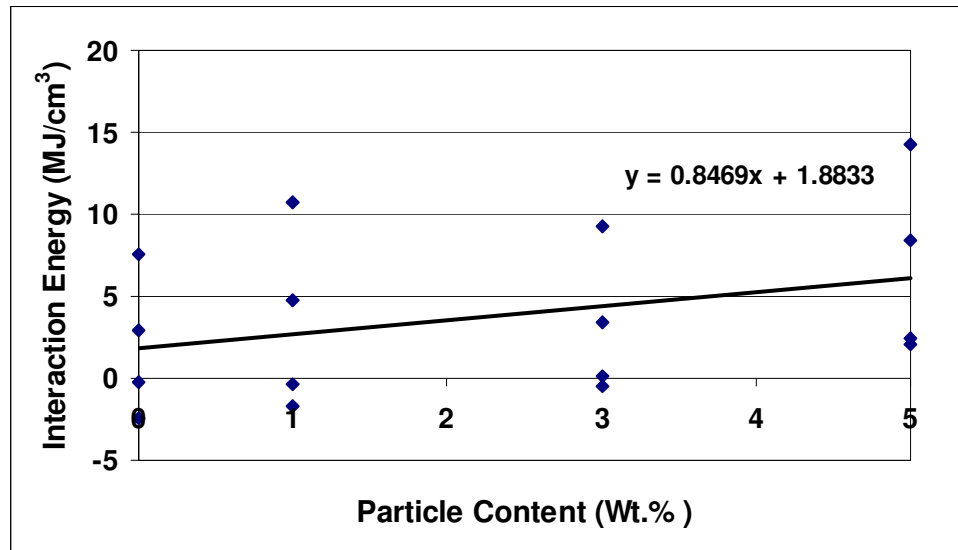
การนำค่าอันตรกิริยาเพื่อไปสร้างสมการทำได้โดยการนำค่าอันตรกิริยาที่ความเคียดต่างๆกันมาหาความสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคเซรามิก จากนั้นหาสมการแนวโน้มเพื่อนำไปรวมกับสมการการดูดซับพลังงานซึ่งแต่ละสมการแนวโน้มจะใช้กับสมการการดูดซับพลังงานหนึ่งสมการเท่านั้น



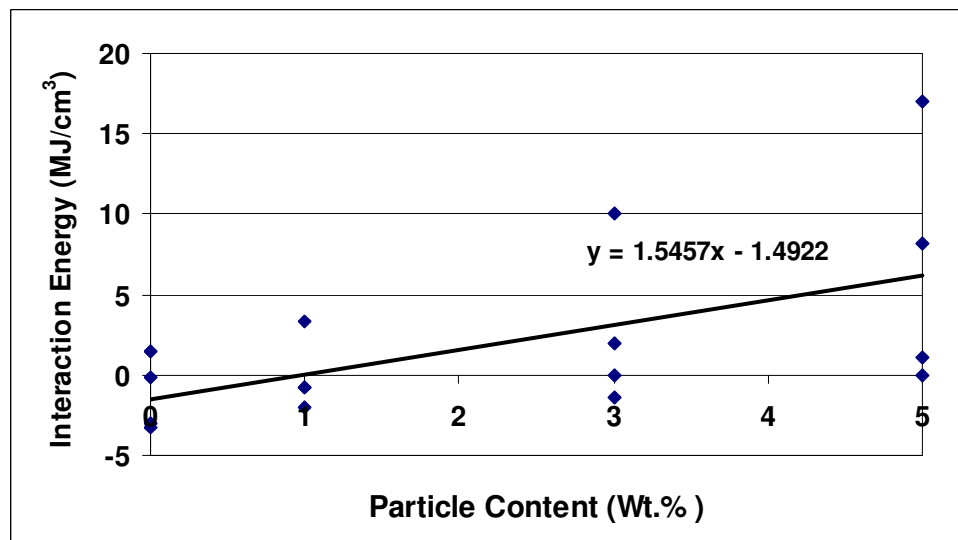
รูปที่ 5ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ความเร็วหัวกัด 5 mm/min



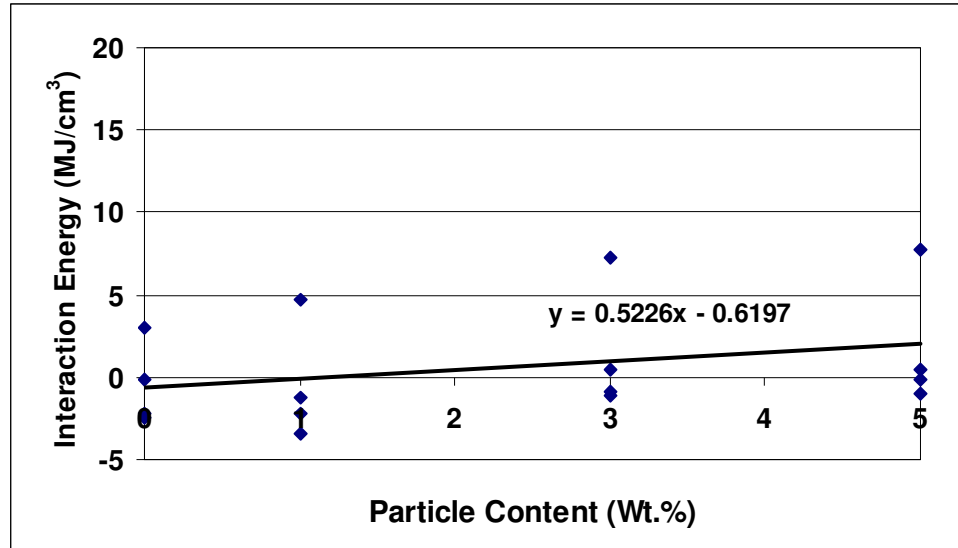
รูปที่ 6ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของโพลีเอทิลีนเสริมอนุภาคอะลูมินาที่ความเร็วหัวกัด 50 mm/min



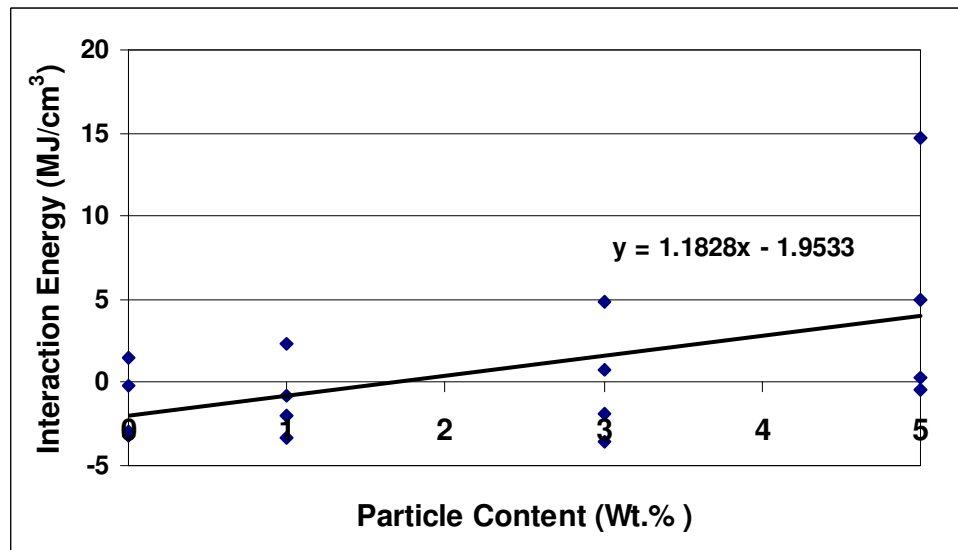
รูปที่ 7ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ความเร็วหัวกัด 5 mm/min



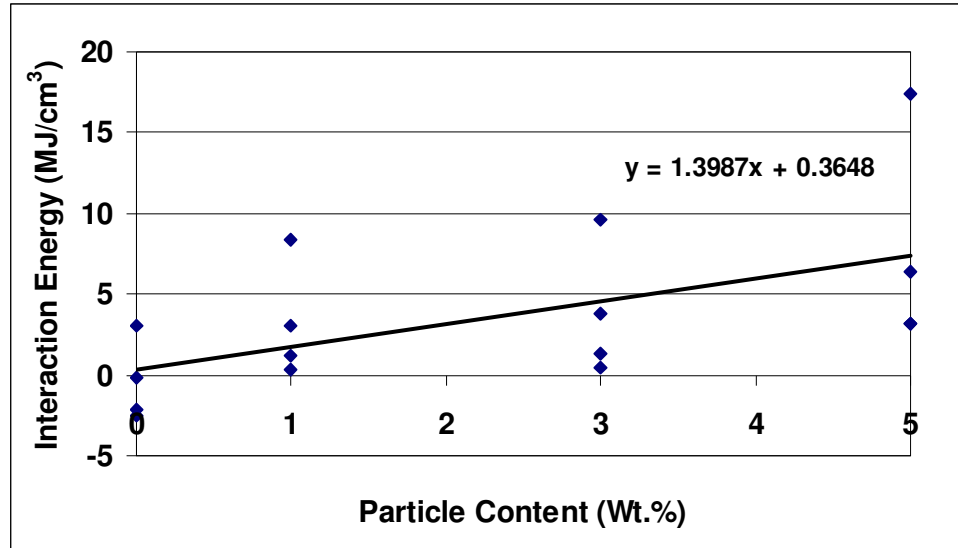
รูปที่ 8ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาที่ความเร็วหัวกัด 50 mm/min



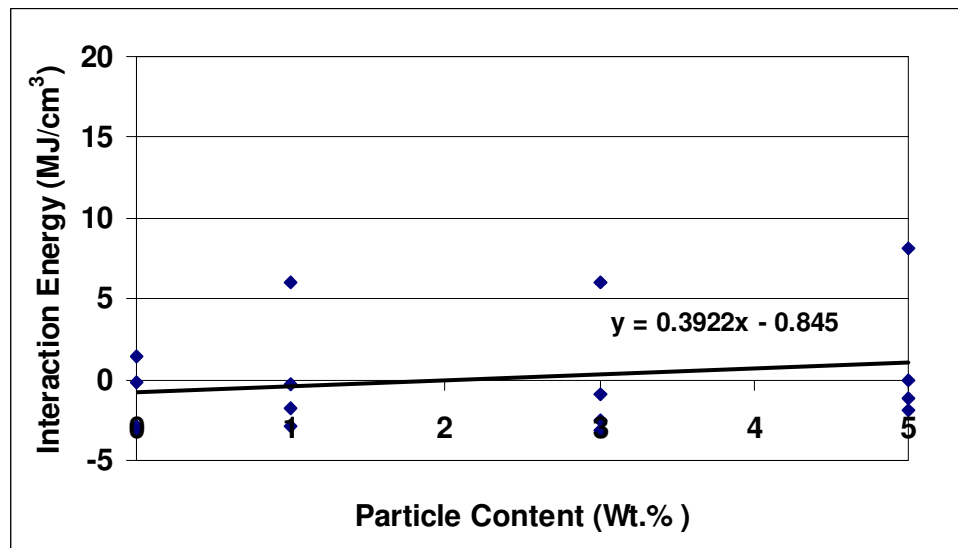
รูปที่ 9ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min



รูปที่ 10ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min



รูปที่ 11ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกัด 5 mm/min



รูปที่ 12ค แสดงพลังงานอันตรกิริยาของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ความเร็วหัวกัด 50 mm/min

จากรูปที่ 5ค ถึง 12ค แสดงให้เห็นถึงเส้นแนวโน้มที่ค่อนข้างคลาดเคลื่อนและไม่ครอบคลุมจึงทำให้สมการแนวโน้มคลาดเคลื่อนไปด้วย เนื่องจากการนำค่าความเครียดทั้งสี่ค่า ได้แก่ ที่ 20% 40% 60% และ 70% ความเครียด มาหาสมการแนวโน้มโดยเปรียบเทียบในตัวแปรเดียวกันคือ ค่าอันตรกิริยา ซึ่งไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวได้ ทั้งนี้อาจทำการแก้ไขได้โดยการใช้วิธีสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการหา



สมการและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมากกว่า 2 ตัวขึ้นไป ในกรณีนี้สามารถนำมาเขียนสมการแนวโน้มได้ดังนี้

$$y = b_{y.xz} + b_{yx.z}x + b_{yz.x}z \quad (10ค)$$

เมื่อ  $b_{y.xz}$ ,  $b_{yx.z}$  และ  $b_{yz.x}$  เป็นค่าคงที่ และ  $x$ ,  $y$  และ  $z$  แทนค่า ปริมาณอนุภาคเซรามิก ค่าอันตรกิริยาและความเครียด ตามลำดับ

จากสมการที่ 10ค ถ้าให้  $z$  คงที่ กราฟของ  $y$  และ  $x$  จะเป็นเส้นตรงมีความชันเป็น  $b_{yx.z}$  ถ้าให้  $x$  คงที่ กราฟของ  $y$  และ  $z$  จะเป็นเส้นตรงมีความชันเป็น  $b_{yz.x}$  ตัวเลขหลังจุดจะแสดงถึงตัวแปรซึ่งเป็นตัวคงที่ในแต่ละกรณี ซึ่งสามารถหาค่าคงที่เหล่านี้ได้จากการแทนค่าต่างๆลงในสมการดังต่อไปนี้ โดย  $n$  คือจำนวนชุดข้อมูล ซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 16

$$\begin{aligned} \sum y &= b_{y.xz}n + b_{yx.z} \sum x + b_{yz.x} \sum z \\ \sum yx &= b_{y.xz} \sum x + b_{yx.z} \sum x^2 + b_{yz.x} \sum xz \\ \sum yz &= b_{y.xz} \sum z + b_{yx.z} \sum xz + b_{yz.x} \sum z^2 \end{aligned} \quad (11ค)$$

จะได้สมการ 3 สมการ และตัวแปร 3 ตัว ซึ่งสามารถแก้สมการได้ค่าคงที่ แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ 10ค ซึ่งคาดว่าจะได้ผลที่แม่นยำขึ้นเพราะเป็นสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามตัว นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r_{ij}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ได้โดยสมการด้านล่างนี้

$$r_{ij} = \frac{n \sum ij - (\sum i)(\sum j)}{\sqrt{[n \sum i^2 - (\sum i)^2][n \sum j^2 - (\sum j)^2]}} \quad (12ค)$$

โดย  $i$  และ  $j$  แทนตัวแปรที่ต้องการหาความสัมพันธ์กัน หากค่าที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 มากเท่าไร หมายความว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันมากเท่านั้น

สมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนที่คำนวณได้ในแต่ละกรณีทั้งที่ใส่ท่อและไม่ใส่ท่อ รวมทั้งการเติมอนุภาคเซรามิกชนิดต่างๆที่ความเร็วหัวกด 5 และ 50 mm/min แสดงในตาราง 2ค ถึง 9ค

แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.58	2.69	3	40.90	1	-	-	2	-	-	5	-	-
Al + 1wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam	0.57	2.70	2.52	34.86	1	-	-	2	-	-	4	-	-
Al + 3wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam	0.6	2.72	4.45	59.59	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al + 5wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam	0.62	2.73	3.81	50.01	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al foam filled-tube	0.64	2.69	66.6	40.90	11	11	0	21	23	-3	29	31	-2
1wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam filled-tube	0.6	2.70	71.4	34.86	10	11	-1	20	23	-3	30	31	0
3wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam filled-tube	0.6	2.72	85.7	59.59	12	11	1	25	24	2	35	31	4
5wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam filled-tube	0.6	2.73	88	50.01	13	11	1	25	24	2	35	31	4

3ค แสดงสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.63	2.69	3.48	44.58	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 1wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam	0.61	2.70	3.54	46.53	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al + 3wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam	0.61	2.72	4.52	59.78	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al + 5wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam	0.62	2.73	4.00	52.50	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al foam filled-tube	0.57	2.69	62.16	44.58	11	11	0	20	24	-3	29	32	-3
1wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam filled-tube	0.58	2.70	75.35	46.53	13	11	2	25	24	2	37	31	7
3wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam filled-tube	0.61	2.72	80.00	59.78	14	11	3	26	24	3	38	31	6
5wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> foam filled-tube	0.58	2.73	79.81	52.50	14	11	2	26	24	2	38	31	7

4ค แสดงสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.58	2.69	3	40.90	1	-	-	2	-	-	5	-	-
Al + 1wt.% SiO <sub>2</sub> foam	0.58	2.69	4.24	57.80	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al + 3wt.% SiO <sub>2</sub> foam	0.58	2.69	6.13	83.56	1	-	-	3	-	-	7	-	-
Al + 5wt.% SiO <sub>2</sub> foam	0.55	2.69	6.48	91.94	1	-	-	2	-	-	5	-	-
Al foam filled-tube	0.59	2.69	62.4	40.90	11	11	0	21	23	-2	34	31	3
1wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	0.59	2.69	63.30	57.80	11	11	0	22	24	-2	36	31	5
3wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	0.63	2.69	65.60	83.56	12	12	0	24	24	-1	36	33	3
5wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	0.62	2.69	70.50	91.94	13	11	2	26	23	2	39	31	8

5ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.63	2.69	3.48	44.58	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 1wt.% SiO <sub>2</sub> foam	0.59	2.69	6.26	84.24	1	-	-	4	-	-	7	-	-
Al + 3wt.% SiO <sub>2</sub> foam	0.59	2.69	6.64	89.35	1	-	-	4	-	-	7	-	-
Al + 5wt.% SiO <sub>2</sub> foam	0.59	2.69	7.10	95.54	1	-	-	4	-	-	7	-	-
Al foam filled-tube	0.57	2.69	62.16	44.58	11	11	0	20	24	-3	29	32	-3
1wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	0.62	2.69	70.40	84.24	11	12	-1	23	25	-2	32	33	-1
3wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	0.64	2.69	71.60	89.35	12	12	0	23	25	-1	35	33	2
5wt.% SiO <sub>2</sub> foam filled-tube	0.63	2.69	72.35	95.54	12	12	0	26	25	1	41	33	8

6ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.58	2.69	3	40.90	1	-	-	2	-	-	5	-	-
Al + 1wt.% SiC foam	0.62	2.69	6.30	81.75	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al + 3wt.% SiC foam	0.57	2.70	6.42	88.97	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al + 5wt.%SiC foam	0.56	2.71	6.77	95.26	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al foam filled-tube	0.64	2.69	66.6	40.90	11	11	0	21	23	-3	29	31	-2
1wt.% SiC foam filled-tube	0.65	2.69	72.14	81.75	10	12	-1	20	24	-3	29	31	-2
3wt.% SiC foam filled-tube	0.6	2.70	73.76	88.97	10	12	-1	24	24	0	31	31	-1
5wt.% SiC foam filled-tube	0.61	2.71	74.87	95.26	10	11	-1	24	24	0	32	32	0

7ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.63	2.69	3.48	44.58	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 1wt.% SiC foam	0.60	2.69	6.78	90.18	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 3wt.% SiC foam	0.59	2.70	6.92	93.43	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 5wt.% SiC foam	0.61	2.71	6.81	89.84	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al foam filled-tube	0.57	2.69	62.16	44.58	11	11	0	20	24	-3	29	32	-3
1wt.% SiC foam filled-tube	0.58	2.69	72.70	90.18	11	12	-1	21	24	-3	30	32	-2
3wt.% SiC foam filled-tube	0.62	2.70	76.37	93.43	10	12	-2	21	24	-4	33	32	1
5wt.% SiC foam filled-tube	0.62	2.71	78.15	89.84	12	12	0	24	24	0	37	32	5

8ด แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 5 mm/min

ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.58	2.69	3	40.90	1	-	-	2	-	-	5	-	-
Al + 1wt.% TiC foam	0.56	2.70	3.10	43.60	1	-	-	2	-	-	5	-	-
Al + 3wt.% TiC foam	0.57	2.73	5.58	77.89	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 5wt.% TiC foam	0.57	2.75	5.63	79.15	1	-	-	3	-	-	5	-	-
Al foam filled-tube	0.64	2.69	66.6	40.90	11	11	0	21	23	-3	29	31	-2
1wt.% TiC foam filled-tube	0.6	2.70	86.78	43.60	12	11	1	24	23	0	34	31	3
3wt.% TiC foam filled-tube	0.61	2.73	89.21	77.89	13	12	1	24	24	0	36	32	4
5wt.% TiC foam filled-tube	0.62	2.75	94.95	79.15	15	11	3	27	24	3	38	31	6

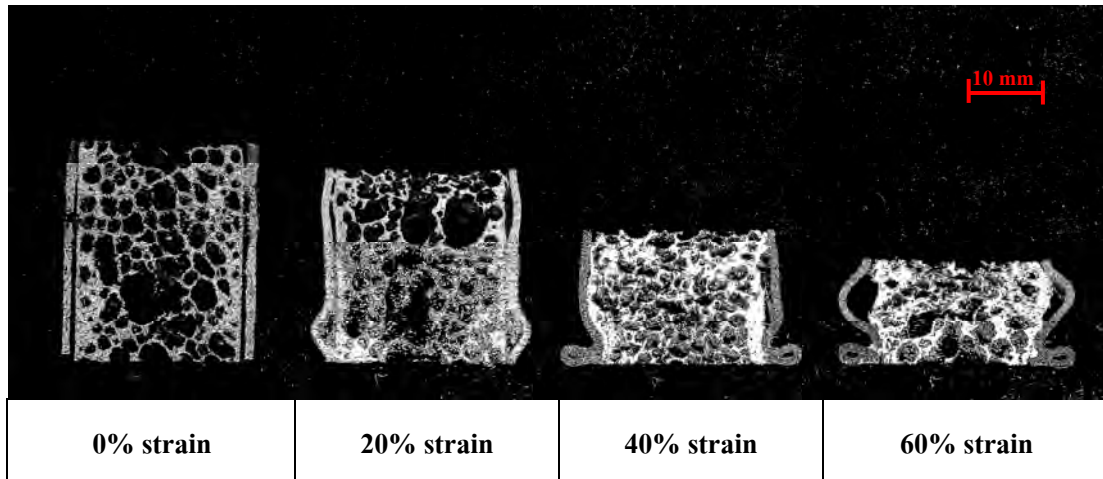


9ค แสดงสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งที่ไม่ใส่ท่อและใส่ท่อที่ความเร็วหัวกด 50 mm/min

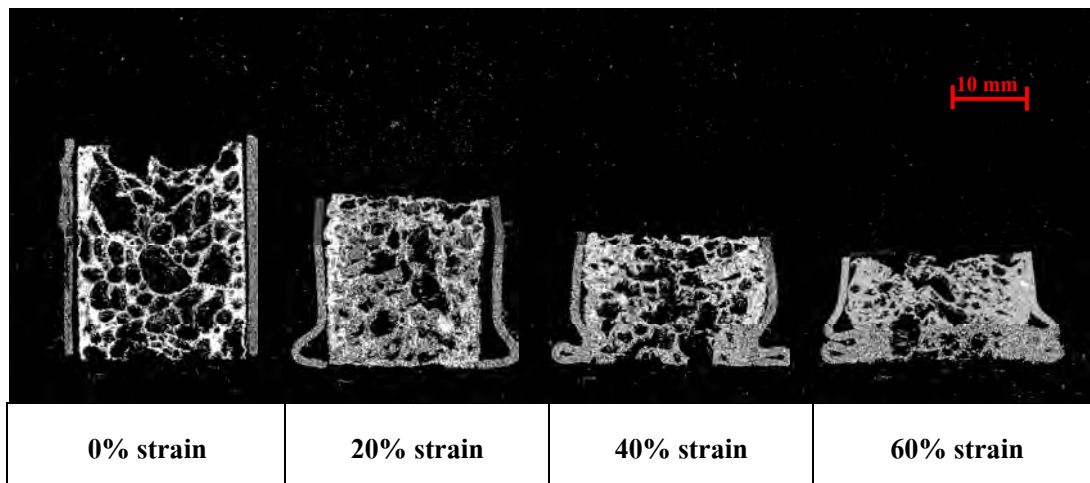
ชิ้นงาน	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Y.S. (MPa)	Y.S.solid (MPa)	E.A. <sub>20%</sub> (MPa)	E.A. <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>40%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)	E.A. <sub>60%</sub> (MPa)	E <sub>foam+tube</sub> (MPa)	E.A. <sub>int</sub> (MPa)
Al foam	0.63	2.69	3.48	44.58	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 1wt.% TiC foam	0.60	2.70	6.27	83.61	1	-	-	3	-	-	6	-	-
Al + 3wt.% TiC foam	0.57	2.73	6.39	89.15	1	-	-	3	-	-	7	-	-
Al + 5wt.% TiC foam	0.56	2.75	6.29	89.62	1	-	-	3	-	-	7	-	-
Al foam filled-tube	0.57	2.69	62.16	44.58	11	11	0	20	24	-3	29	32	-3
1wt.% TiC foam filled-tube	0.62	2.70	74.06	83.61	11	12	0	21	24	-3	30	32	-2
3wt.% TiC foam filled-tube	0.62	2.73	72.76	89.15	11	12	-1	21	24	-3	30	33	-3
5wt.% TiC foam filled-tube	0.64	2.75	75.67	89.62	12	12	0	23	24	-2	32	33	-1

## ภาคผนวก ง

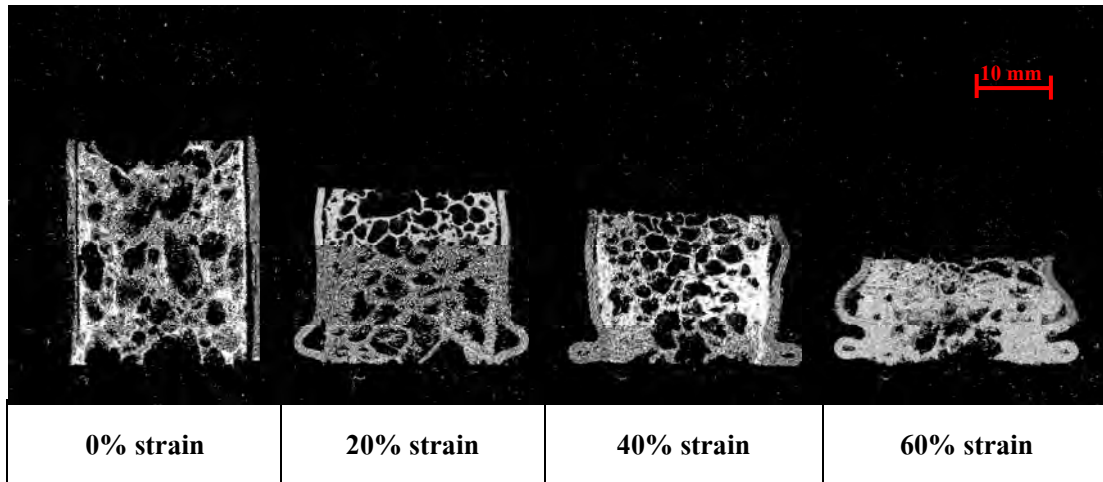
## พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมในท่อ



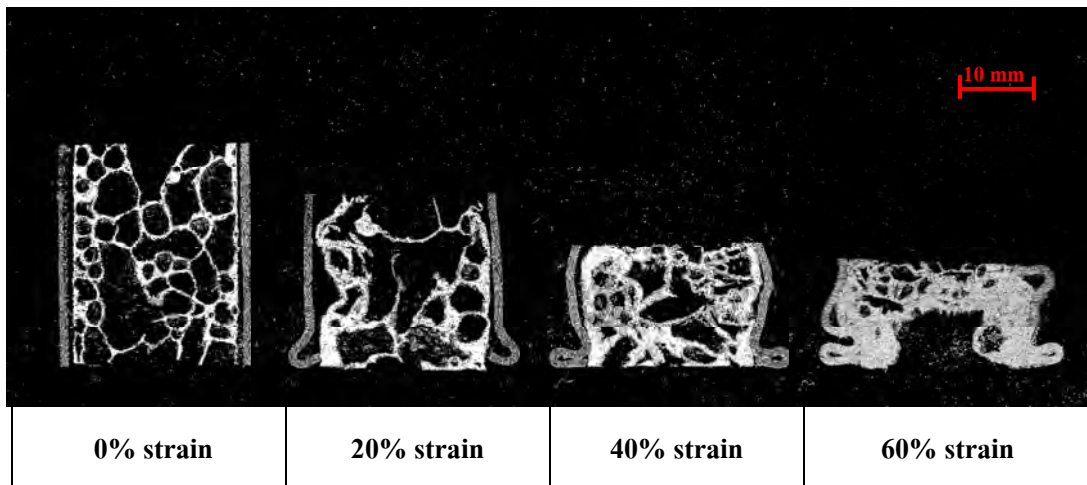
รูปที่ 1ง แสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมบรรจุในท่อ



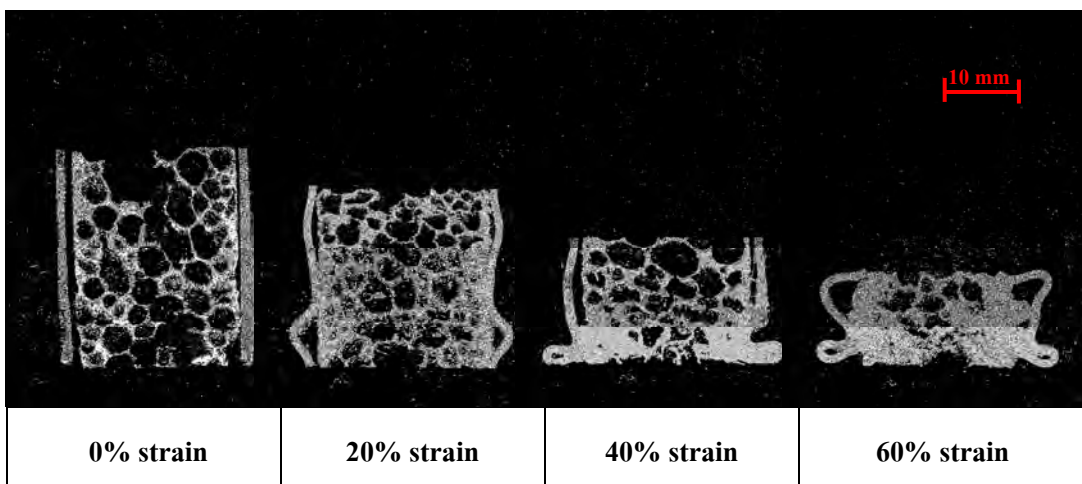
รูปที่ 2ง แสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคอะลูมินาในท่อ



รูปที่ 3ง แสดงพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกาใส่ท่อ



รูปที่ 4ง แสดงพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิกอนคาร์บอนใส่ท่อ



รูปที่ 5ง แสดงพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมเสริมอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ใส่ท่อ

**ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์**

ชื่อ – นามสกุล	นาย อภิวิช โอภา
วัน เดือน ปีเกิด	วันอังคารที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526
ที่อยู่	19/32 หมู่ 23 ถนนพุทธมณฑลสาย 1 แขวงบางระมาด เขตตลิ่งชัน กทม. 10170
ประวัติการศึกษา	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2538 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนราชสีมา วิทยาลัย ปี พ.ศ.2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี พ.ศ.2548
โทรศัพท์	0-24486-772