

ผลของจีเอ็มจากโรงไฟฟ้าต่อความสามารถการโพนและสมบัติทางกลของโพนอะลูมิเนียม

นายอัคร์ธนดล ประภากร์สว่างศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECT OF POWER PLANT ASHES ON FOAMABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES
OF ALUMINIUM FOAMS

Mr. Attanadol Prapajaraswong

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของไข้เฝ้าจากโรงไฟฟ้าต่อความสามารถการโหม
และสมบัติทางกลของโหมอะลูมิเนียม

โดย

นายอัทธ์ธันดล ประภาจรัสวงศ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาญ เหลืองวรรณันท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. เรืองเดช ชงศรี)

อัทธ์รณดล ประภาจรัสวงค์ : ผลของขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้าต่อความสามารถการโฟมและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม. (Effect of power plant ashes on foamability and mechanical properties of aluminium foams) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 137 หน้า.

ปัญหาสำคัญของการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีผงโลหะคือ โฟมมีเสถียรภาพต่ำ ทำให้โฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีการขยายตัวไม่มากเท่าที่ควรและมีโครงสร้างโพรงอากาศที่ไม่ดี งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของขนาดและปริมาณของขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้าต่อการขยายตัว โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม โดยมีการแบ่งขี้เถ้าออกเป็น 4 ขนาด โดยใช้ตะแกรงร่อนคัดขนาดเบอร์ 60, 120 และ 400 ตามลำดับ ปริมาณขี้เถ้าแปรผันอยู่ในช่วง 0-5 wt.% อุณหภูมิที่ใช้ผลิตโฟมคือ 800 °C ภายใต้บรรยากาศปกติ โดยใช้เวลาในการเผา 300, 315, 330, 345 และ 360 วินาที ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า การเติมขี้เถ้าในปริมาณ 1-2 wt.% จะช่วยเพิ่มการขยายตัวและช่วยให้โครงสร้างของโฟมมีความสม่ำเสมอดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้าที่มีการขยายตัวสูงสุดคือ โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมขี้เถ้าลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm ในปริมาณ 1 wt.% เนื่องจากอนุภาคขี้เถ้าจะเพิ่มความหนืดและขัดขวางการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการเติมขี้เถ้าในปริมาณมากเกินไปจะทำให้การขยายตัวลดต่ำลงและโครงสร้างของโฟมมีความสม่ำเสมอลดลง โฟมอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้าที่มีการขยายตัวต่ำสุดคือ โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมขี้เถ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm เนื่องจากความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่มากเกินไป อนุภาคขี้เถ้ายังช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของโฟมด้วยเช่นกัน อนุภาคขี้เถ้าซึ่งฝังตัวอยู่ในผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau borders จะช่วยให้โฟมมีโครงสร้างสม่ำเสมอและทำให้โฟมมีสมบัติทางกลดีขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิติ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

5370237621 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ALUMINIUM FOAM / COMPOSITES FOAM / FLY ASH PRECIPITATOR / FLY ASH CENOSPHERE / BOTTOM ASH / POWDER METALLURGY

ATTANADOL PRAPAJARASWONG : EFFECT OF POWER PLANT ASHES ON FOAMABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM FOAMS.

ADVISOR : ASSOC. PROF. SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D., 137 pp.

A major problem in fabrication of Al foams via powder metallurgy route is that the stability of the foams is low, resulting in poor foam expansion and non-uniform pore structure. The objective of the present research project is to study the effect of power plant ash addition on the expansion, structure and mechanical properties of Al foams. The power plant ashes are classified as cenosphere and precipitator fly ashes, and bottom ash. The ashes were separated into 4 different size ranges, using sieve no. 60, 120 and 400, respectively. The content of the ashes added into Al foams were varied from 0 to 5 wt.%. Foaming process was performed by inserting a precursor into a preheated furnace at 800°C. The foaming times were varied between 300 and 360 s, with an interval of 15 s.

It was found that the addition of ashes, in all cases, in the range of 1-2 wt.% can significantly improve foam expansion and pore structure, compared with the pure Al foam. The most optimum foam expansion and stability was obtained from the addition of 1 wt.% precipitator fly ash, with the average diameter of 51 µm, due to increasing viscosity of Al melt by the ash. Adding further amount of ashes, however, leads to a decrease in foam expansion and deterioration of pore structure. The worst foam expansion was obtained from the addition of 14 µm mean diameter cenosphere fly ash, as a result of too high viscosity of molten Al. The mechanical properties of foams were also improved by power plant ash addition. The ash particles, embedded in cell walls and Plateau borders, strengthen pore structure, resulting in more uniform foam structure and better mechanical properties.

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

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

Academic Year : 2012 Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย สำหรับการดูแลเอาใจใส่ ให้การสนับสนุน และคอยให้คำปรึกษาแนะนำตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้ ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสาร์ตพร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์, ดร. เรืองเดช ชงศรี ที่ให้ความรู้และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการทำงานวิจัย ขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอบรมสั่งสอนตลอดระยะเวลาที่ผู้จัดทำได้ศึกษาอยู่ที่ภาควิชาแห่งนี้ ขอบพระคุณบุคลากรเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน โดยเฉพาะคุณชองทอง จรัสสิงห์ ที่คอยช่วยเหลือให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น และขอบคุณเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมโลหการสำหรับมิตรภาพที่แน่นแฟ้นตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบชิ้นงานต่างๆ ขอบพระคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวประภาจรัสวงศ์, ครอบครัวนามนันทสิทธิ์และครอบครัวศิริมหาโชคสกุล โดยเฉพาะมารดา นางสาวอวิษัษฐ ประภาจรัสวงศ์ และบิดา นายประภาส ประภาจรัสวงศ์ ที่คอยยื่นเคียงข้างและให้กำลังใจบุตรชายตลอดมา นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงมิตรสหายทุกท่านที่เป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	
2.1 โฟมโลหะ.....	4
2.1.1 ประเภทของโฟมโลหะ.....	4
2.1.2 ความหนาแน่นของโฟมโลหะ.....	5
2.1.3 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ.....	6
2.1.4 ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศ.....	6
2.1.5 การใช้งานของโฟมโลหะ.....	6
2.2 โฟมอะลูมิเนียม.....	7
2.3 กรรมวิธีการผลิต.....	8
2.4 กรรมวิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง.....	10
2.5 กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง.....	11
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมโลหะโดยกรรมวิธีโลหะผง	12

2.6.1 โลหะหลัก.....	12
2.6.2 ความหนาแน่นของ Precursor	13
2.6.3 สารปล่อยแก๊ส.....	14
2.6.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์.....	15
2.6.5 อัตราการให้ความร้อน.....	18
2.6.6 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์.....	19
2.6.7 วัสดุผสม.....	21
2.7 การเพิ่มเสถียรภาพของโพลีเมอร์.....	22
2.8 สมบัติทางกลของโพลีเมอร์.....	26
2.8.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโพลีเมอร์.....	26
2.8.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโพลีเมอร์.....	28
2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของโพลีเมอร์.....	29
2.9 วัสดุผสมเนื้อพินโลหะ.....	31
2.9.1 รอยต่อระหว่างเนื้อพินและตัวเสริมแรง.....	33
2.9.2 กฎแห่งการผสม.....	34
2.10 จี๊เจ้าจากโรงไฟฟ้า.....	35
2.10.1 จี๊เจ้าเปียก.....	35
2.10.2 จี๊เจ้าลอย.....	35
2.11 คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของจี๊เจ้า.....	35
2.11.1 จี๊เจ้าเปียก.....	35
2.11.2 จี๊เจ้าลอย.....	37
2.12 วัสดุผสมเนื้อพินโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยจี๊เจ้าลอย.....	39
2.13 การใช้อนุภาคจี๊เจ้าลอยในโพลีเมอร์.....	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	46

3.3.1 การเตรียมและการตรวจสอบคุณลักษณะของจี๊เจ้าจากโรงไฟฟ้า.....	46
3.3.1.1 การล้างสิ่งสกปรก.....	46
3.3.1.2 การกำจัดสารมลทิน	46
3.3.1.3 การคัดขนาดอนุภาค.....	46
3.3.2 การผลิต Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม	47
3.3.2.1 การผลิต Precursor	47
3.3.2.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม	47
3.3.3 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม	47
3.3.4 การทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม.....	49
3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Precursor.....	50
3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม.....	50
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	
4.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาค.....	52
4.2 การคัดขนาดอนุภาค.....	53
4.3 การกระจายตัวของอนุภาคจี๊เจ้า.....	54
4.4 ส่วนประกอบทางเคมีของจี๊เจ้า	55
4.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Precursor หลังการอัดขึ้นรูป.....	58
4.6 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน.....	62
4.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	65
4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม.....	73
4.8.1 โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....	73
4.8.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมจี๊เจ้าเปียก.....	73
4.8.3 โฟมอะลูมิเนียมผสมจี๊เจ้าลอย Precipitator.....	77
4.8.4 โฟมอะลูมิเนียมผสมจี๊เจ้าลอยชนิด Cenosphere	81
4.9 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม.....	84
4.10 สมบัติทางกล	89

4.10.1 สมบัติการรับแรงอัด.....	89
4.10.2 การทดสอบความแข็ง.....	95
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	
5.1 เสถียรภาพทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้า.....	98
5.2 ผลของชนิดขี้เถ้าต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	99
5.3 ผลของขนาดและปริมาณของอนุภาคต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	101
5.4 ผลของขี้เถ้าที่มีต่อโครงสร้างของโฟม.....	102
5.5 ผลของขี้เถ้าต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม.....	105
5.5.1 ความแข็งแรงความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดของโฟม อะลูมิเนียม	105
5.5.2 ความแข็งระดับจุลภาค.....	108
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	110
6.2 ข้อเสนอแนะ	113
รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	137

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบทางเคมีของซี้เถ้าเปียกที่ได้จากโรงไฟฟ้า Tunçbilck ประเทศตุรกี..	36
2.2	ส่วนประกอบทางเคมีของซี้เถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้า Raichur ประเทศอินเดีย...	38
2.3	สัดส่วน โดยปริมาตรของโครงสร้างผลึก Quartz และ Mullite ในซี้เถ้าลอยชนิด Precipitator.....	38
2.4	สัดส่วน โดยปริมาตรของโครงสร้างผลึก Quartz และ Mullite ในซี้เถ้าลอยชนิด Cenosphere.....	39
2.5	สมบัติทางกลของอะลูมิเนียม A356 เสริมแรงด้วยซี้เถ้าลอยที่ปริมาณต่างๆ.....	40
2.6	ความสามารถในการดูดซับพลังงานของ โฟม 4032 และ โฟม 4032 เสริมแรงด้วยซี้เถ้าลอย.....	43
4.1	แสดงปริมาณซี้เถ้าในช่วงขนาดต่างๆ.....	53
4.2	การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซี้เถ้าเปียก.....	54
4.3	การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซี้เถ้าลอยชนิด Precipitator.....	54
4.4	การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซี้เถ้าลอยชนิด Cenosphere.....	55
4.5	ส่วนประกอบทางเคมีของซี้เถ้า.....	55

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	(ก) โครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดและ (ข) โครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด.....	5
2.2	แผนภาพการใช้โฟมโลหะในงานประเภทต่างๆ	7
2.3	โฟมอะลูมิเนียมรูปทรงต่างๆ สำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน.....	8
2.4	ขนาดของโพรงอากาศและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตแบบต่างๆ.....	9
2.5	กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะ 4 กลุ่มหลัก.....	9
2.6	ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง	11
2.7	การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ความหนาแน่นของ Precursor ต่างๆ.....	13
2.8	กราฟการขยายตัวและลักษณะโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่อุณหภูมิ 800 °C ณ เวลาต่างๆ.....	16
2.9	กราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 6061 และ AISi7 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	17
2.10	การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม 6061 ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ.....	19
2.11	ผลของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมภายใต้สภาวะการให้ความร้อนเดียวกัน.....	20
2.12	ผลของแรงดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม.....	21
2.13	ผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงตึงผิว.....	21
2.14	ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม.....	22
2.15	บริเวณ Plateau border.....	23
2.16	แสดงผลของอนุภาคของแข็งต่อการลดลงของ Capillary pressure.....	24
2.17	(ก) อนุภาคที่มีสมบัติเปียกที่ดีและ (ข) อนุภาคที่มีสมบัติเปียกไม่ดี.....	24
2.18	กราฟแสดงผลของขนาดและปริมาณอนุภาคที่มีต่อเสถียรภาพของฟองแก๊สในน้ำ.....	25
2.19	กราฟความเค้นความเครียดแสดงช่วงการผิดรูป 3 แบบ (ก) โฟมในอุดมคติ (ข) โฟมโลหะที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ.....	27
2.20	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับความพรุนของ	
รูปที่		หน้า

	โพลีอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg0.45 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานกับความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg0.45	29
2.21	แสดงกราฟความแข็งแบบ Brinell ของอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg2 เสริมแรงด้วย SiC-p ที่ปริมาณต่างๆ.....	32
2.22	แสดงกราฟค่าความแกร่งของอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg2 เสริมแรงด้วย SiC-p ที่ปริมาณต่างๆ.....	32
2.23	แสดงกราฟความแข็งแรงของอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg2 เสริมแรงด้วย SiC-p ที่ปริมาณต่างๆ.....	33
2.24	SEM จี้เข้าเป็ยภายในคอนกรีต.....	36
2.25	(ก) SEM จี้เข้าลอยแบบ Precipitator ขนาด 75-106 μm (ข) SEM จี้เข้าลอยแบบ Cenosphere ขนาด 106-150 μm	37
2.26	การแตกของอนุภาคจี้เข้าลอยภายในชิ้นงานอะลูมิเนียม.....	41
2.27	กราฟแสดง Plateau stress, Yield stress และ Plastic stress ของโพลีอะลูมิเนียมเกรด 4032 และโพลีอะลูมิเนียมเกรด 4032 เสริมแรงด้วยจี้เข้าลอย.....	42
2.28	กราฟความเค้น-ความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ โพลีอะลูมิเนียมเกรด 4032 เสริมแรงด้วยจี้เข้าลอย.....	42
2.29	โครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ 4032 เสริมแรงด้วยจี้เข้าลอย.....	43
2.30	โครงสร้างจุลภาคของโพลีอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ 4032 เสริมแรงด้วยจี้เข้าลอย.....	44
3.1	ทิศทางการตัด โพลีอะลูมิเนียมสำหรับทดสอบการรับแรงอัด.....	49
3.2	ทิศทางการตัด Precursor.....	50
3.3	ทิศทางการตัด โพลีอะลูมิเนียมสำหรับการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค.....	51
4.1	ภาพ SEM ผงอนุภาค.....	53
4.2	ผลการวิเคราะห์ XRD ของจี้เข้าเป็ย.....	57
4.3	ผลการวิเคราะห์ XRD ของจี้เข้าลอยชนิด Precipitator	57
4.4	ผลการวิเคราะห์ XRD ของจี้เข้าลอยชนิด Cenosphere.....	58
4.5	ภาพ SEM ของชิ้นงาน Precursor อะลูมิเนียมผสมจี้เข้าเป็ย.....	59
รูปที่		หน้า
4.6	ภาพ SEM ของชิ้นงาน Precursor อะลูมิเนียมผสมจี้เข้าลอยชนิด Precipitator.....	61

4.7	ภาพ SEM ของชิ้นงาน Precursor อะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere.....	62
4.8	การวิเคราะห์ทางความร้อน (DSC) ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที.....	63
4.9	การวิเคราะห์ทางความร้อน (DSC) ที่อัตราการเย็นตัว 20°C/นาที.....	64
4.10	การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 457 μm	65
4.11	การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 186 μm	66
4.12	การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 78 μm	67
4.13	การขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm	68
4.14	การขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm	69
4.15	การขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 12 μm	70
4.16	การขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 65 μm	71
4.17	การขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm	72
4.18	โครงสร้างมหภาคของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียก.....	75
4.19	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียม และ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 457 μm	76
4.20	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียม และ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 186 μm	76
4.21	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียม และ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 78 μm	77
4.22	โครงสร้างมหภาคของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอย	
รูปที่	Precipitator.....	หน้า 79
4.23	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียม	

	และโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อย precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm	80
4.24	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมอะลูมิเนียม และโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อย precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm	80
4.25	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมอะลูมิเนียม และโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อย precipitator ขนาดเฉลี่ย 12 μm	81
4.26	โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อย Cenosphere.....	82
4.27	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมอะลูมิเนียม และโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 65 μm	83
4.28	กราฟแสดงจำนวนโพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมอะลูมิเนียม และโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm	83
4.29	ภาพ SEM ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....	84
4.30	ภาพ SEM ของโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้เปลือก.....	85
4.31	ภาพ SEM ของโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อยชนิด Precipitator.....	87
4.32	ภาพ SEM ของโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อยชนิด Cenosphere.....	88
4.33	กราฟแสดงค่าความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟม อะลูมิเนียมผสมจีไถ้เปลือก.....	90
4.34	กราฟแสดงค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้เปลือก.....	91
4.35	กราฟแสดงค่าการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสม จีไถ้เปลือก.....	92
4.36	กราฟแสดงค่าความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟม อะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อยชนิด Precipitator.....	93
4.37	กราฟแสดงค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อยชนิด Precipitator.....	94
4.38	กราฟแสดงค่าการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสม	
รูปที่	จีไถ้ล้อยชนิด Precipitator.....	หน้า 95
4.39	ความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมจีไถ้เปลือก.....	96
4.40	ความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมจีไถ้ล้อยชนิด Precipitator.....	96

4.41	ความแข็งของเนื้อพื้้นอะลูมิเนียมผสมซี่้ถ้ำลอยชนิด Cenosphere.....	97
5.1	แบบจำลองการเป็ยกของของเหลวบนของแข็ง.....	103
5.2	การกระจายตัวของอนุภาคภายในเนื้อพื้้น.....	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่น่าสนใจและมีการใช้งานกันแพร่หลายกันมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยานเนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น เช่น มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแรงอัดที่ดี โฟมอะลูมิเนียมจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระแทกได้เป็นอย่างดี

กรรมวิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีหลายวิธี หนึ่งในกรรมวิธีการผลิตที่ได้รับความนิยมมากก็คือกรรมวิธีผงโลหะ วิธีนี้มีหลักการผลิตที่สำคัญคือการใช้ผงอะลูมิเนียมผสมกับสารสร้างแก๊สและอัดด้วยความดันสูงให้เป็นชิ้นงานที่เรียกว่า Precursor จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสลายตัวของสารสร้างแก๊ส ทำให้เกิดแก๊สขึ้นใน Precursor ที่กำลังอยู่ในสภาพกึ่งของแข็งของเหลว การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมจะใช้เวลาเพียงไม่กี่นาทีและได้รูปร่างสุดท้ายใกล้เคียงกับแบบของแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิต อย่างไรก็ตามในขณะที่โฟมเกิดการขยายตัว น้ำโลหะอะลูมิเนียมจะไหลไปยังฐานของโฟมตามแรงดึงดูดของโลกทำให้เกิดการพังตัวของโพรงอากาศ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้โฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีโครงสร้างหยาบและมีขนาดและการกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังทำให้โฟมมีสมบัติทางกลด้อยลง

การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยกรรมวิธีโลหะผงสามารถทำได้ด้วยการเติมอนุภาคเซรามิกลงไปใน Precursor เนื่องจากผงอนุภาคเซรามิกจะช่วยเพิ่มความหนืดให้กับน้ำโลหะอะลูมิเนียมขณะกำลังหลอมเหลว ทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความหนืดเพิ่มขึ้นและทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลไปยังฐานของโฟมได้ยากขึ้น นอกจากนี้อนุภาคเซรามิกยังเป็นตัวช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโฟมอะลูมิเนียมอีกด้วย

อนุภาคเซรามิกที่นำมาใช้เพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมในส่วนใหญ่มักราคาแพง ดังนั้นในการทำวิจัยนี้จึงได้ทดลองนำซีเมนต์จากโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ประกอบด้วยซีเมนต์และซีเมนต์เปือก มาใช้แทนอนุภาคเซรามิก เนื่องจากซีเมนต์จากโรงไฟฟ้าเป็นวัสดุดิบที่หาง่าย ราคาถูก

เพราะเป็นของเสียที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยการทำวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าเปียกที่มีต่อการขยายตัว ลักษณะโพรงอากาศและสมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าเปียกมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในโพลีอะลูมิเนียม

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณ ขนาด และประเภทของอนุภาคขี้เถ้าต่อพฤติกรรมการขยายตัว โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และพฤติกรรมการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ตรวจสอบพฤติกรรมการขยายตัวและพฤติกรรมทางกลของโพลีอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนขี้เถ้า 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 wt. %

1.3.2 ใช้ขี้เถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง คือขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าเปียก

1.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโพลีอะลูมิเนียม คือ 800°C ภายใต้บรรยากาศปกติ

1.3.4 ช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตโพลีอะลูมิเนียมคือ 300, 315, 330, 345 และ 360 วินาที

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

ขี้เถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าแต่ละชุด จะมีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันเล็กน้อย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจเรื่องการผลิตโพลีอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง

- 1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของปริมาณ ขนาดของขี้เถ้าและเวลาที่ใช้ในการเผา ที่มีผลต่อการขยายตัว ลักษณะ โพรงอากาศและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม
- 1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลต่างๆ
- 1.5.4 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของการขยายตัว โพรงอากาศและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม เมื่อเพิ่มเสถียรภาพด้วยขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าเปียก
- 1.5.5 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเสริมแรงและการสร้างเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม โดยการใช้อ่อนภาคขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าเปียก
- 1.5.6 สามารถประยุกต์การใช้วัสดุเสริมแรงที่หาง่ายและราคาถูก ไปใช้กับวัสดุทางวิศวกรรมอื่นๆได้

บทที่ 2

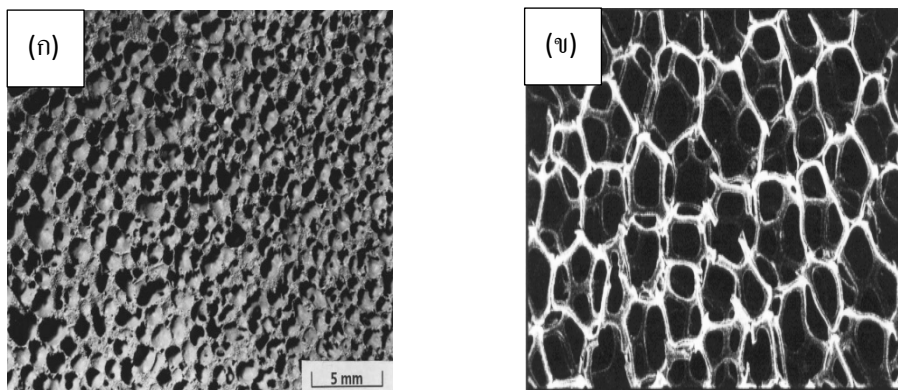
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะเป็นวัสดุโลหะวิศวกรรมที่มีรูพรุนอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก โดยมีปริมาณรูพรุน (Porosity) หรือจำนวนโพรงอากาศ (Pore) สูง ประกอบด้วยอากาศร้อยละ 60 โดยปริมาตรขึ้นไป ส่วนที่เหลือเป็นเนื้อโลหะ จึงทำให้มีความหนาแน่นต่ำและมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันที่มีปริมาตรเท่ากัน นอกจากนี้โฟมโลหะยังมีสมบัติโดดเด่นอีกหลายอย่างเช่น มีความแข็งดึงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ดี ทนต่ออุณหภูมิใช้งานสูงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ โฟมพอลิเมอร์และไม่เปราะแตกง่ายเหมือนโฟมเซรามิก

2.1.1 ประเภทของโฟมโลหะ

ในการพิจารณาแยกประเภทของโฟมโลหะ สามารถทำได้โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศภายในโฟม ดังนั้นจึงสามารถแบ่งโฟมโลหะได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ โฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด (Close-cell foams) ดังรูป 2.1(ก) และโฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด (Open-cell foams) ดังแสดงรูป 2.1(ข) โดยโฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดจะมีลักษณะคล้ายกับชั้นเยื่อหุ้มโพรงอากาศทั้งหมดทำให้ของไหลไม่สามารถไหลผ่านได้ โฟมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด โพรงอากาศจะเชื่อมต่อกันเป็นร่างแห โดยไม่มีผนังโพรงอากาศ ทำให้ของไหลสามารถไหลผ่านโครงสร้างของโฟมได้ [1]



รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด [2] (ข) โครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด [3]

2.1.2 ความหนาแน่นของโฟมโลหะ

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

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

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ

ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ

ความหนาแน่นของโฟมโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน [1]

2.1.3 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ

ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ (P) ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตรของโลหะชนิดนั้นๆ โดยปริมาณของโพรงอากาศแสดงได้ดังสมการ (2.2)

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

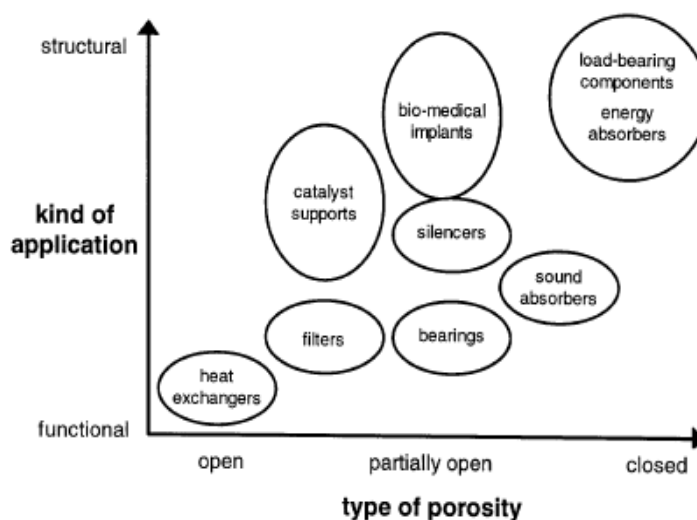
โดยทั่วไปอาจเรียกปริมาณของโพรงอากาศได้ว่าความพรุน

2.1.4 ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศ

สมบัติทางกลของโฟมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศทั้งค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าความแข็งแรง (Strength) นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าความหนาแน่นเป็นไปตามที่กำหนดไว้ รูปร่างโพรงอากาศจะส่งผลต่อความแข็งแรงของโฟมมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ อย่างไรก็ตามขนาดของโพรงอากาศยังคงเป็นปัจจัยสำคัญและมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟม [1]

2.1.5 การใช้งานของโฟมโลหะ

ในปัจจุบันโฟมโลหะเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน เนื่องจากโฟมโลหะเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาช่วยประหยัดพลังงานและยังประหยัดเนื้อวัสดุที่ใช้ในการผลิตอีกด้วย โฟมโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดมีสมบัติด้านการดูดซับพลังงานที่ดีจึงเหมาะสำหรับการผลิตเป็นชิ้นส่วนกันชนของรถยนต์ สำหรับโฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบเปิดจะมีสมบัติทางกลด้อยกว่าโครงสร้างแบบปิด แต่จุดเด่นของโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดคือของไหลสามารถไหลผ่านได้ รวมถึงมีพื้นที่ผิวมาก สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็น ตัวคัดกรองอนุภาค หรือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการใช้งานของโฟมโลหะจึงขึ้นกับลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศของโฟม [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพการใช้โฟมโลหะในงานประเภทต่างๆ [2]

2.2 โฟมอะลูมิเนียม

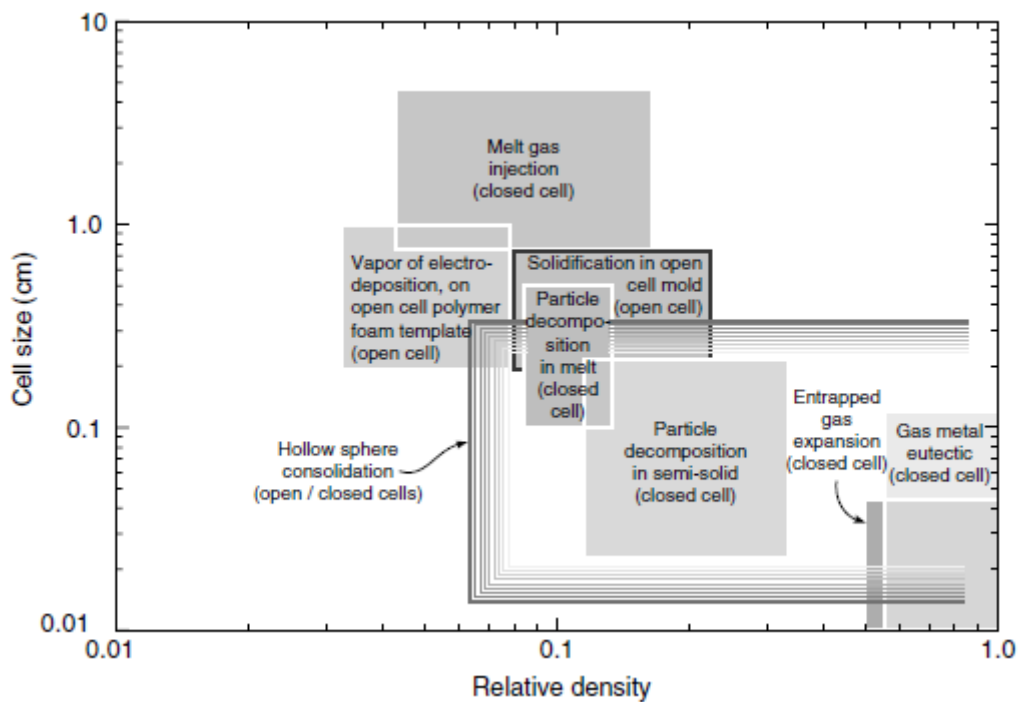
โฟมอะลูมิเนียมคือ โฟมที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต โดยโฟมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความพรุนสูง ประกอบไปด้วยโครงอากาศกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม สมบัติเด่นของโฟมอะลูมิเนียมคือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดที่ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าโฟมพอลิเมอร์ สามารถผลิตให้มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ ทำให้สามารถลอยน้ำได้ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตกแต่งภายในและภายนอกได้ สามารถนำมารีไซเคิลได้และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม การใช้งานหลักๆ ของโฟมอะลูมิเนียมคือ ใช้ทำโครงสร้างแขนวิซ ใช้เป็นอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกในรถยนต์ ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่และใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียงบนถนน ในปัจจุบันโฟมโลหะที่ผลิตขึ้นส่วนใหญ่เป็นโฟมอะลูมิเนียม เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตได้ง่ายกว่าโฟมโลหะชนิดอื่น



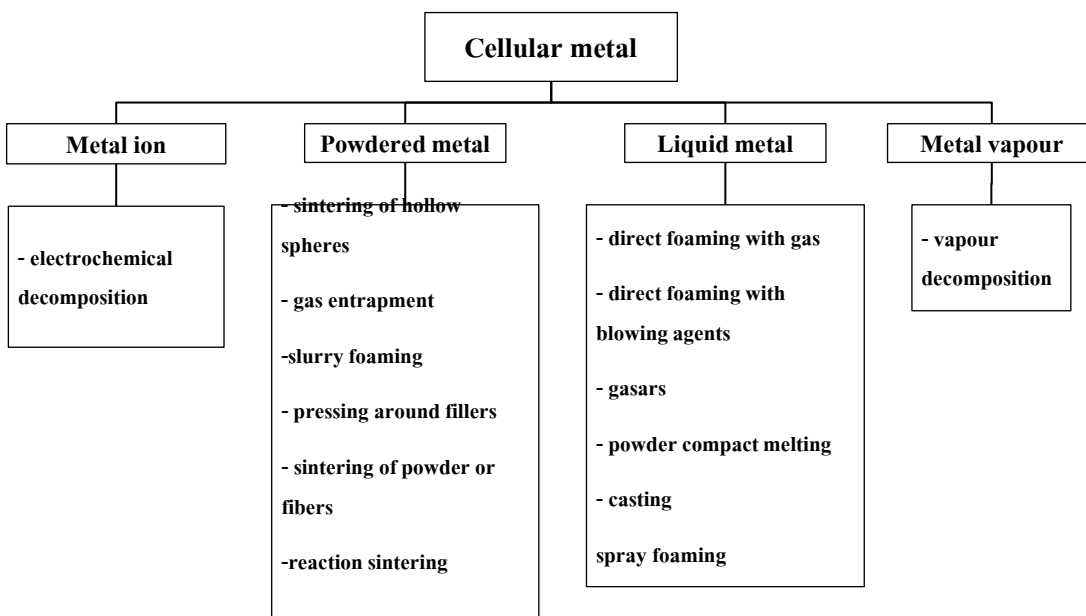
รูปที่ 2.3 โฟมอะลูมิเนียมรูปทรงต่างๆ สำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน [2]

2.3 กรรมวิธีการผลิต

กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะสามารถทำได้หลายวิธี การใช้กรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดโฟมโลหะที่มีลักษณะต่างกัน ทั้งทางด้านรูปร่าง ลักษณะของโพรงอากาศ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ดังรูปที่ 2.4 ลักษณะที่แตกต่างกันนี้ทำให้โฟมโลหะสามารถถูกนำไปใช้งานได้หลากหลายแล้วแต่ความเหมาะสม กรรมวิธีการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะ กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะโดยใช้ผงโลหะ กรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไอโลหะและกรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไอออนของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อย่างไรก็ตาม โฟมโลหะจะถูกผลิตขึ้นโดยวิธีใช้น้ำโลหะหรือใช้ผงโลหะเป็นส่วนใหญ่ [1]



รูปที่ 2.4 ขนาดของโพรงอากาศและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟม โลหะที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตแบบต่างๆ [3]



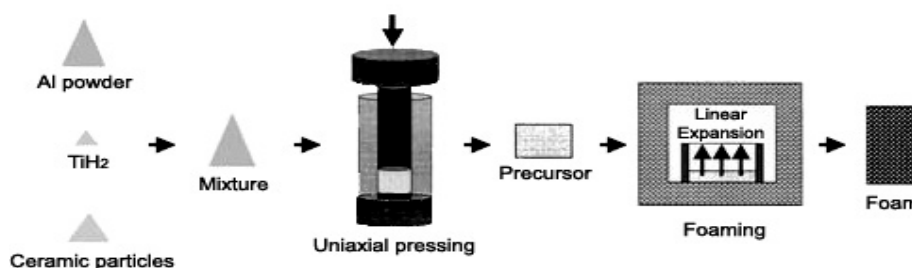
รูปที่ 2.5 กรรมวิธีการผลิต โฟม โลหะ 4 กลุ่มหลัก

2.4 กรรมวิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง

กระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมวิธีนี้เริ่มจากการผสมผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์หรือผงอะลูมิเนียมอัลลอยเข้ากับสารสร้างแก๊ส (Foaming agent) ให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยทั่วไปสารสร้างแก๊สมีหลายชนิด เช่น ไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (ZrH_2) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เป็นต้น แต่สำหรับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะนิยมใช้สารสร้างแก๊สเป็นไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวให้แก๊สของ TiH_2 จะอยู่ที่ประมาณ 400-450°C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียม (660°C) ปริมาณของ TiH_2 ที่ใช้จะอยู่ที่ระหว่าง 0.5-1.0 wt.% ซึ่งเพียงพอต่อการสร้างโพรงอากาศภายในโฟมได้ [4, 5, 6] ผงที่ผ่านการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างดีแล้ว จะถูกนำไปอัดขึ้นรูป ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วจะเรียกว่า “Foamable precursor” หรือเรียกสั้นๆว่า “Precursor” การอัดขึ้นรูปนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบเย็นและแบบร้อน เช่น การอัดด้วยความดันแกนเดียว (Uniaxial pressing), การอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทางแบบเย็น (Cold-isostatic pressing) การอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทางแบบร้อน (Hot-isostatic pressing), การอัดผ่านแบบที่อุณหภูมิสูง (Extrusion) การอัดขึ้นรูปที่ใช้ความร้อนนั้นมีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากกว่า เนื่องจากจะได้ความหนาแน่นของ Precursor ที่สูงใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของโลหะ แต่สำหรับผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์การอัดขึ้นรูปแบบเย็นก็สามารถที่จะผลิต Precursor ที่มีความหนาแน่นสูงได้ จากนั้นนำ Precursor ไปใส่ในแม่พิมพ์และนำไปเข้าเตาอบ เมื่อให้ความร้อนแก่ Precursor จนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของ อะลูมิเนียม ไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) จะปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซึ่งจะสร้างโพรงอากาศใน Precursor ที่หลอมเหลวทำให้เกิดการขยายตัวขึ้นและจะได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูพรุนแบบปิด การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผงมีขั้นตอนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.6 โฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตได้จากวิธีโลหะผงจะมีโพรงอากาศแบบปิด มีขนาดโพรงอากาศ 1-8 mm และมีความพรุน 63-89% [7]

ข้อดีของการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผงคือ สามารถผลิตได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างที่ต้องการและมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิต

จากกรรมวิธีโลหะเหลว ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือ ผงโลหะมีราคาสูงและการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ทำได้ยากเนื่องจากการขยายตัวของโฟมมีขีดจำกัด [8, 9]



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง [10]

2.5 กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง

ในระหว่างการให้ความร้อนแก่ Precursor สารปล่อยแก๊สภายในชิ้นงานจะแตกตัวให้แก๊สทำให้เกิดการขยายตัวของ Precursor หลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของโลหะ ซึ่งกลไกการขยายตัวของ Precursor จะส่งผลต่อรูปร่างและขนาดโพรงอากาศของโฟมที่ผลิต กลไกการขยายตัวของโฟมโลหะอาจแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ สภาวะเริ่มเกิดโพรงอากาศ การโตขึ้นของโพรงอากาศ และการยุบตัวของโฟม [1]

ขั้นตอน 1 เริ่มเกิดโพรงอากาศ

โดยจะเริ่มเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการที่สารปล่อยแก๊สแตกตัวให้แก๊ส ออกมา รูปร่างของโพรงอากาศที่ได้จะขึ้นกับทิศทางการอัด Precursor ในขั้นตอนนี้ Precursor จะมีการขยายตัวประมาณ 0-30 % โดยปริมาตร

ขั้นตอน 2 การโตขึ้นของโพรงอากาศ

ในขั้นตอนนี้ โพรงอากาศที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้จะเกิดการขยายตัวและมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากได้รับปริมาณแก๊สจากการสลายตัวของสารสร้างแก๊สมากขึ้นและยังเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศที่แตกออก รูปร่างของโพรงอากาศจะเริ่มเปลี่ยนจากแบบยาวในทิศตั้งฉากกับทิศ

ของแรงอัดไปเป็นโพรงอากาศที่มีลักษณะกลม เมื่อโพรงอากาศขยายตัวต่อไปจนไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับเกิดโพรงอากาศลักษณะกลมได้อีก จะเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ในขั้นตอนนี้ Precursor จะมีการขยายตัวประมาณ 50-400 % โดยปริมาตร

ขั้นตอน 3 การพังตัวของโฟม

หลังจากที่โพรงอากาศขยายตัวมากที่สุดและการสลายตัวของสารปล่อยแก๊สใกล้ยุติลง จะเกิดการพังตัวของโฟมขึ้นทำให้ได้โพรงอากาศที่มีรูปร่างผิดปกติ กลไกหลักในการพังตัวของโฟมคือการไหลของน้ำโลหะไปยังฐานโฟม (Drainage) และการรวมกันของโพรงอากาศ (Cell coalescence) สำหรับกลไกการไหลของน้ำโลหะไปที่ฐานโฟม เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงโลก (Gravity force) และผลของแรงแคปิลลารี (Capillary force) ทำให้น้ำโลหะไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำส่งผลให้บริเวณฐานของโฟมมีลักษณะเป็นชั้นหนาของน้ำโลหะ สำหรับการรวมตัวของโพรงอากาศเกิดจากการที่โพรงอากาศ 2 โพรงรวมตัวกันเกิดเป็นโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นผลจากการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศ

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมโลหะโดยกรรมวิธีโลหะผง

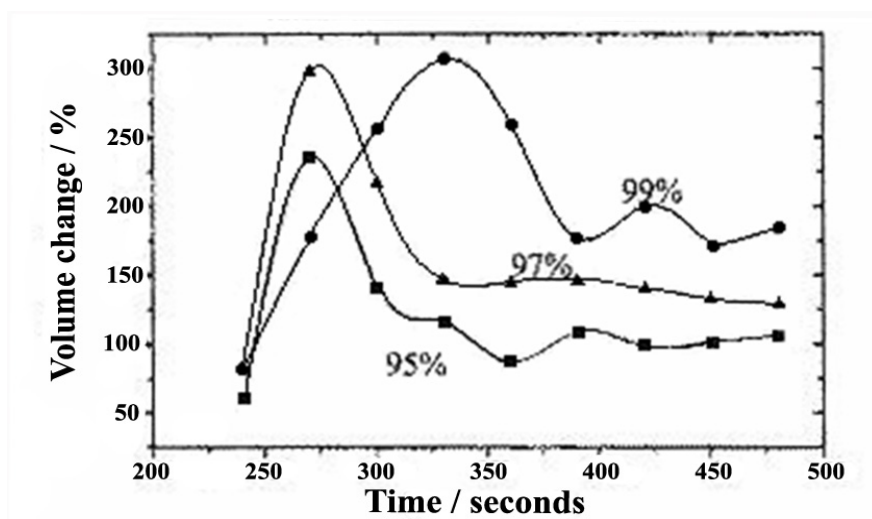
ในการผลิตโฟมโลหะด้วยกรรมวิธีโลหะผง มีปัจจัยหลักๆที่ส่งผลต่อการขยายตัวและโครงสร้างของโฟมได้แก่ โลหะหลักที่ใช้ สารปล่อยแก๊ส ความหนาแน่นของ Precursor อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต อัตราการให้ความร้อน บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมโลหะ และธาตุผสมในโฟมโลหะ [1]

2.6.1 โลหะหลัก

โดยทั่วไปในทางทฤษฎี โลหะเกือบทุกชนิดสามารถนำมาผลิตเป็นโฟมโลหะได้ การนำโลหะต่างชนิดกันมาผลิตเป็นโฟมจะให้ผลที่แตกต่างกัน เช่น การใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมอัลลอยเกรดต่างๆจะพบว่า อะลูมิเนียมอัลลอย AlSi12 จะได้โฟมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเนื่องจาก AlSi12 มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 557 °C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวของ TiH_2 มากที่สุด (400-450°C) [1]

2.6.2 ความหนาแน่นของ Precursor

ในการอัดขึ้นรูป Precursor นั้น พบว่าความหนาแน่นของ Precursor จะต้องมีความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) ไม่ต่ำกว่า 94% จึงจะทำให้เกิดการขยายตัวได้ [8, 9] เนื่องจากที่ความหนาแน่นทางทฤษฎี 94% นั้นเป็นความหนาแน่นที่ช่องว่างในชิ้นงานที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected porosities) เปลี่ยนไปเป็นช่องว่างที่ไม่เชื่อมต่อกัน (Closed porosities) อย่างไรก็ตามพบว่าเพื่อให้เกิดการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ดีนั้น จำเป็นที่จะต้องขึ้นรูป Precursor ให้มีความหนาแน่นทางทฤษฎีไม่น้อยกว่า 97% ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ความหนาแน่นของ Precursor ต่างๆ [8]

ถ้าความหนาแน่นของ Precursor ไม่เพียงพอจะทำให้มีรูพรุนเชื่อมต่อกันอยู่ใน Precursor เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารสร้างแก๊สระหว่างการให้ความร้อน สามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโฟม (Foamability) ของ Precursor ลดลง

การเพิ่มความหนาแน่นของ Precursor สามารถทำได้โดยเพิ่มแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป Precursor เนื่องจากการเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูป จะทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างผงโลหะเพิ่มมากขึ้นและจะทำให้เกิดการเชื่อมติดแบบเย็นของผงมากขึ้น (Cold welding) การเชื่อมติดกันของผงโลหะจะทำให้แก๊สแพร่ผ่านได้ยากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูปยังเป็นการช่วยเพิ่ม

เสถียรภาพของโพลีโพลีเอทิลีน เนื่องจากเกิดการแตกหักของชั้นฟิล์มออกไซด์บริเวณผิวของโพลีโพลีเอทิลีน ฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวจะมีส่วนช่วยป้องกันการพังตัวของโพรงอากาศ [11]

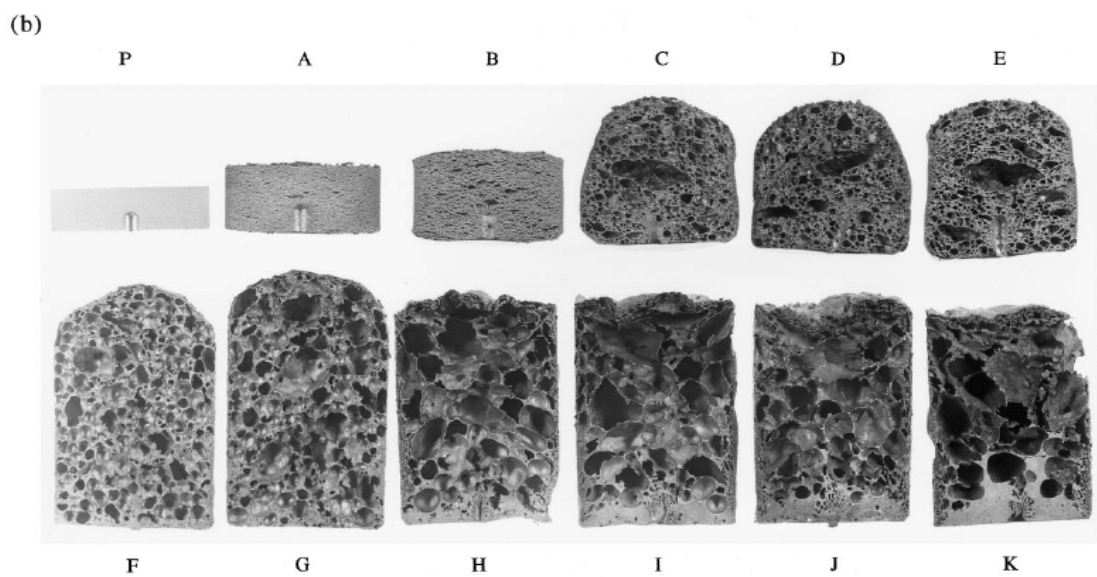
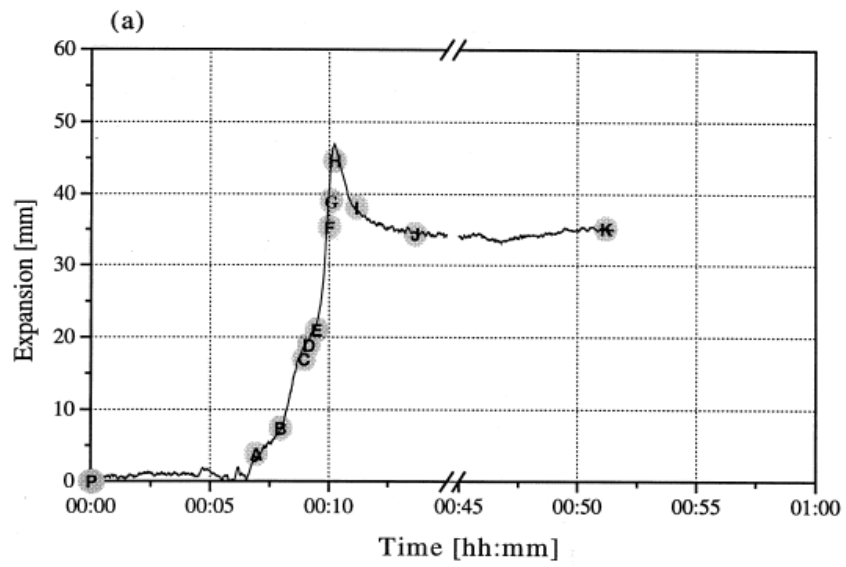
2.6.3 สารปล่อยแก๊ส

ในการผลิตโพลีเอทิลีน สารปล่อยแก๊สที่นิยมใช้มากที่สุดคือไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) เนื่องจากมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ $400-450\text{ }^{\circ}C$ ซึ่งใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของโพลีเอทิลีนที่ $660\text{ }^{\circ}C$ อย่างไรก็ตามการปล่อยแก๊สไฮโดรเจนปริมาณมากจะเกิดที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}C$ ขึ้นไป อัตราการปล่อยแก๊สของ TiH_2 ขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของอะตอมไฮโดรเจนผ่านชั้นฟิล์มของโพลีเอทิลีนไฮไดรด์ [12] นอกจากนี้การใช้ผง TiH_2 ที่ขนาดต่างๆกันจะมีอุณหภูมิในการสลายตัวแตกต่างกันด้วย [13] จากการศึกษาของ Yang และ Nakae [14] พบว่าสามารถผลิตโพลีเอทิลีนที่มีรูพรุนสม่ำเสมอได้ถ้าสามารถควบคุมปริมาณของ TiH_2 และอุณหภูมิการสลายตัวได้อย่างเหมาะสม

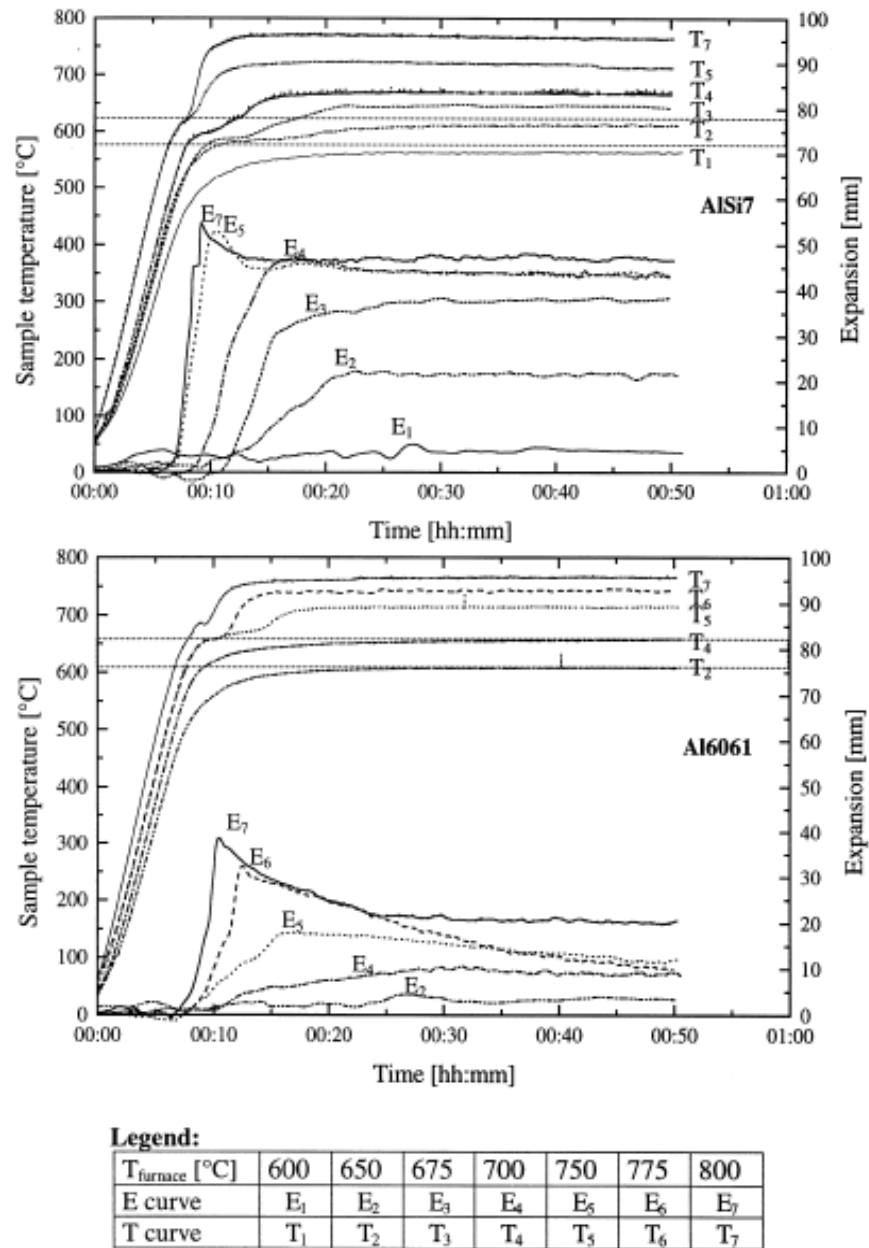
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของโพลีเอทิลีนไฮไดรด์ที่ยังไม่ผ่านการอัดขึ้นรูปอยู่ที่ประมาณ $380-570^{\circ}C$ [15, 16] อย่างไรก็ตามช่วงอุณหภูมินี้ใช้ได้เฉพาะกับโพลีเอทิลีนไฮไดรด์ที่ยังไม่ผ่านการอัดขึ้นรูปเท่านั้น นอกจากนี้มีปัจจัยต่างๆอีกหลายอย่างที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของ TiH_2 ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน บรรยากาศที่ให้ความร้อนและการเปราะแตกของ TiH_2 จากการศึกษาของ F. Von Zeppelin [17] พบว่าการสลายตัวของ TiH_2 นั้นขึ้นอยู่กับบรรยากาศที่ให้ความร้อน ถ้าในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่แม้เพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ TiH_2 เปลี่ยนไป เนื่องจากออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับ TiH_2 เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ขึ้น ซึ่งชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของ TiH_2 เพิ่มขึ้น [15, 16] นอกจากนี้แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปก็มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของ TiH_2 ด้วยเนื่องจากหากใช้แรงดันที่สูงเพียงพอที่จะทำให้โพลีเอทิลีนไฮไดรด์ที่มีลักษณะเปราะเกิดการแตกออก จะทำให้เกิดผิวใหม่ที่ไม่มีความเครียดฟิล์มออกไซด์ปกคลุมส่งผลให้ความสามารถในการสลายตัวเกิดได้ง่ายขึ้น จากการศึกษาของ Youn และ Kang [18] พบว่าปริมาณของโพลีเอทิลีนไฮไดรด์มีผลต่อรูปร่างของโพรงอากาศภายในโครงสร้างโพลี โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของโพลีเอทิลีนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจะทำให้โพรงอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

2.6.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา Precursor เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการผลิตโฟมโลหะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและ โครงสร้างของโฟมจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน Precursor ยังขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้อีกด้วย จากการศึกษาของ Duarte and Banhart [19] พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลอย่างมากต่อการขยายตัวของโฟมที่ทำจาก AISi7 และ อะลูมิเนียมเกรด 6061 ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมควรอยู่ในระหว่างแนวการแข็งตัว (Solidus temperature) และแนวการหลอมเหลว (Liquidus temperature) เพื่อให้ Precursor เกิดการขยายตัวเป็นโฟมขนาดใหญ่ได้ ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตต่ำกว่าแนวการแข็งตัวแล้ว การขยายตัวของโฟมจะต่ำ และถ้าหากใช้อุณหภูมิในการผลิตสูงกว่าแนวการหลอมตัวขึ้นไปอีก จะทำให้การสลายตัวให้แก่ของสารสร้างแก๊สเกิดขึ้นมาก ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของโฟมอย่างมาก อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดการพังตัวอย่างรวดเร็วหลังจากที่โฟมขยายตัวถึงจุดสูงสุด เนื่องจากน้ำโลหะจะมีความหนืดลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ความเสถียรของโฟม ลดลง จากการศึกษาของ Youn และ Kang [18] พบว่าในระหว่างการขยายตัวของโฟมในช่วงระยะเวลาแรกนั้น การกระจายตัวของโพรงอากาศจะมีความสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การขยายตัวสูงขึ้น การที่อัตราการขยายตัวสูงจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ของน้ำโลหะมากขึ้นและ โพรงอากาศจะมีความหยาบมากขึ้น (Coarsening) เนื่องจากการรวมกันของโพรงอากาศ สำหรับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 600-800°C



รูปที่ 2.8 กราฟการขยายตัวและลักษณะโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่อุณหภูมิ 800 °C ณ เวลาต่างๆ [19]



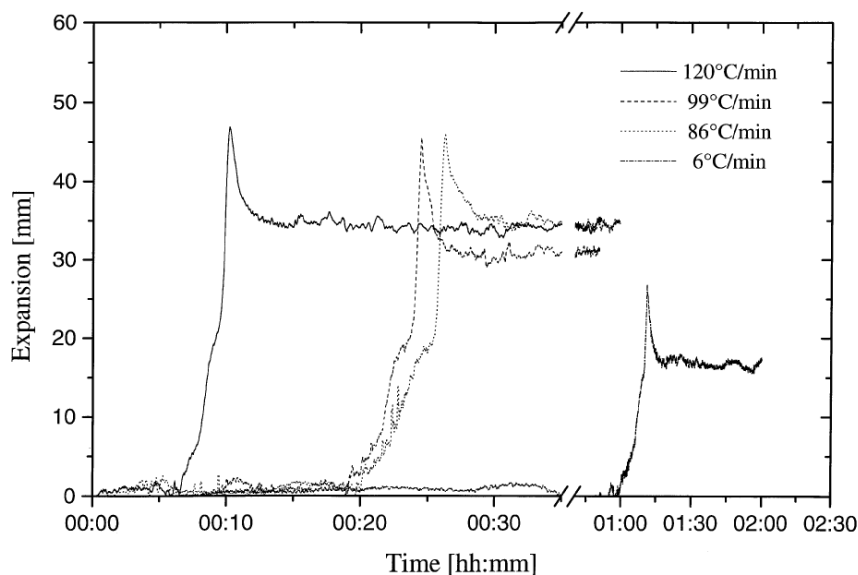
รูปที่ 2.9 กราฟการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 6061 และ AISi7 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

2.6.5 อัตราการให้ความร้อน

โดยทั่วไปในการผลิต โฟม โลหะ นิยมใช้อัตราการให้ความร้อนที่สูงเนื่องจากการหลอมเหลวอย่างรวดเร็วของ Precursor จะทำให้เกิดการขยายตัวของโฟมที่มากขึ้นและเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาของ Simancik [20] พบว่าเมื่อผลิต โฟม อะลูมิเนียมด้วยอัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น จะทำให้โฟมที่ได้มีความหนาแน่นลดลงและมีการกระจายตัวของโพรงอากาศดีขึ้น และโพรงอากาศที่ได้จะมีลักษณะกลมมากขึ้นด้วย

จากการศึกษาถึงผลของอัตราการให้ความร้อนต่อการผลิตโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061 ได้ผลเป็นไปดังรูปที่ 2.10 ที่อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น จะเกิดการขยายตัวของ Precursor เร็วกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากเกิดการหลอมเหลวของ Precursor ที่เร็วกว่า และที่อัตราการให้ความร้อนไม่แตกต่างกันมากนักพบว่า อัตราการขยายตัวของ Precursor มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำกว่ามากพบว่าอัตราการขยายตัวสูงสุดของ Precursor มีค่าต่ำกว่าที่อัตราการให้ความร้อนอื่นๆ ซึ่งเหตุผลที่อาจเป็นไปได้เนื่องมาจาก

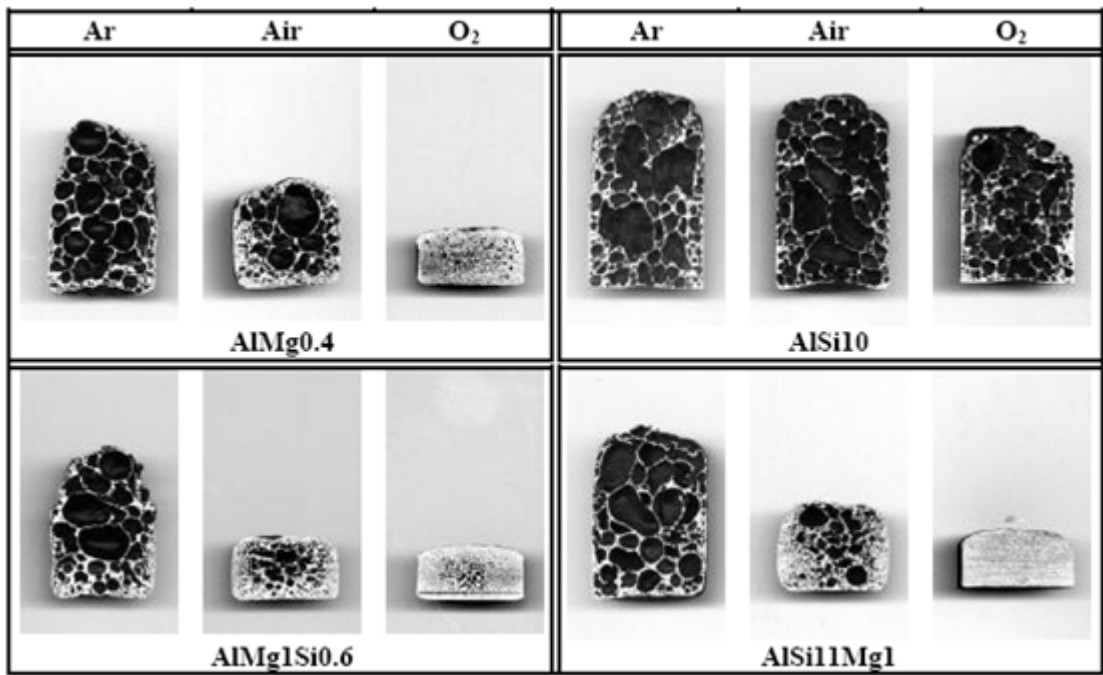
1. แก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ได้แพร่ออกไปจาก Precursor ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 500°C เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์อย่างรวดเร็ว
2. เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ขึ้นที่ผิวของ Precursor และบริเวณภายในของ Precursor ที่อากาศสามารถผ่านเข้าไปได้ ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีจุดหลอมเหลวสูงมากจึงทำให้อยู่ในสถานะของแข็งตลอดทั้งกระบวนการผลิต โฟมและมีส่วนในการยับยั้งการขยายตัวของ Precursor



รูปที่ 2.10 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียม 6061 ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ [19]

2.6.6 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโพลี

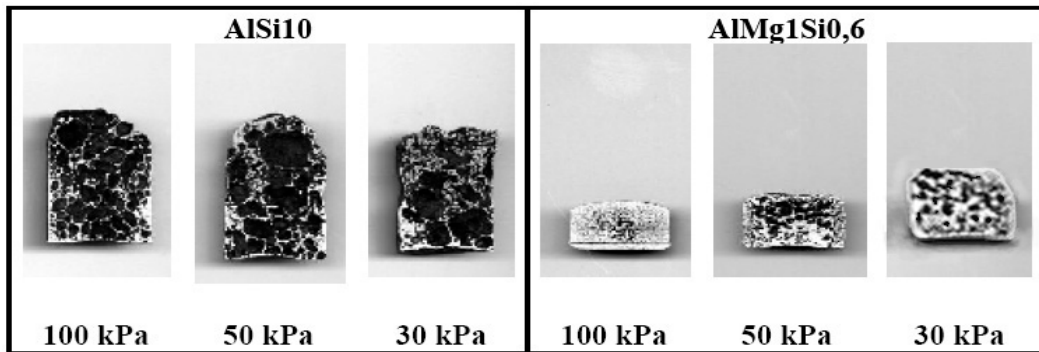
บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโพลีเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีต่อการขยายตัวของโพลี บรรยากาศที่ใช้จะมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของโลหะ สำหรับอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะที่เกิดออกซิเดชันได้ง่าย การผลิตโพลีในบรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) จะส่งผลทำให้การขยายตัวของโพลีซึ่งมีส่วนผสมของแมกนีเซียม (Mg) เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่โลหะที่มีแนวโน้มจะเกิดออกซิเดชันต่ำ สภาวะบรรยากาศที่ใช้จะไม่ส่งผลต่อการขยายตัวของโพลีมากนัก ในส่วนของอะลูมิเนียมที่ไม่มีส่วนผสมของ Mg สภาวะบรรยากาศจะไม่ส่งผลต่อการขยายตัวมากนักเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ผลของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนเดียวกัน [21]

จากการศึกษาของ Simancik [21] พบว่าความดันภายนอกที่ลดลงจะทำให้ความแตกต่างระหว่างความดันระหว่างผิวของโฟมที่กำลังขยายตัวมีมากขึ้น ส่งผลให้ผิวหน้าของโฟมเกิดการขยายตัวมากขึ้น และอาจทำให้โครงสร้างภายในไม่สม่ำเสมอเนื่องจากโพรงอากาศขนาดเล็กรวมตัวเป็นโพรงอากาศขนาดใหญ่เกือบทั้งหมด ในทางกลับกันในกรณีที่ความดันภายนอกสูงเกินไปจะทำให้โฟมมีขนาดเล็กลงเนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นไปยับยั้งการขยายตัวของโฟม ดังแสดงในรูปที่

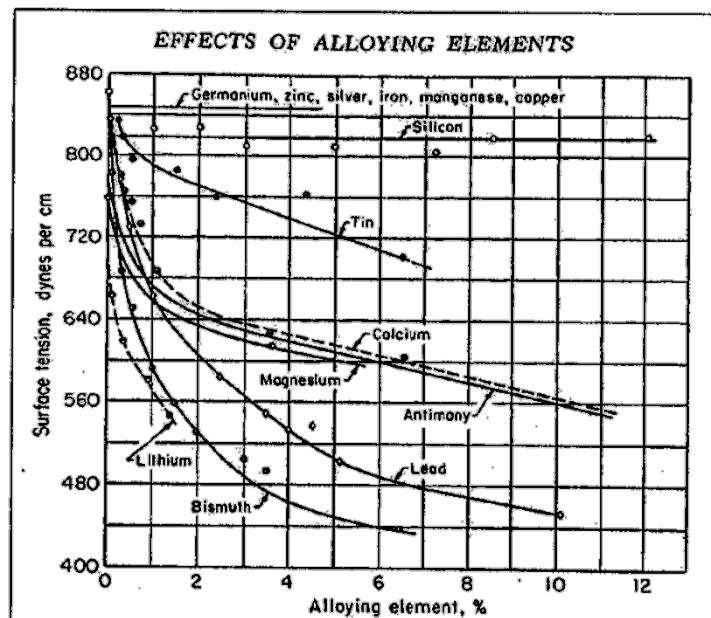
2.12



รูปที่ 2.12 ผลของแรงดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม [21]

2.6.7 ธาตุผสม

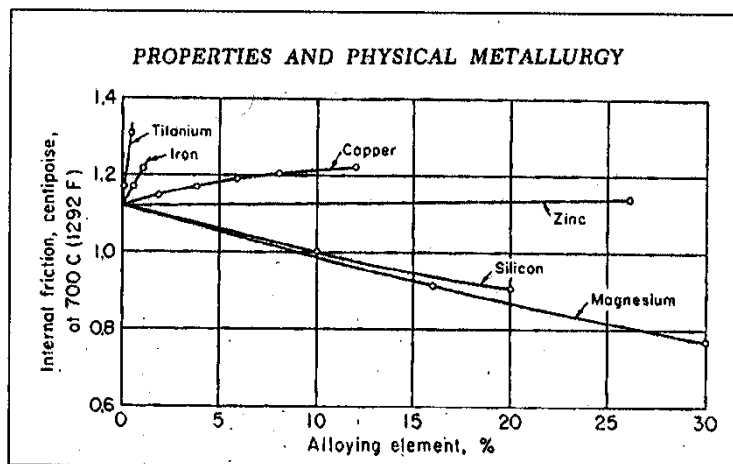
ธาตุผสมมีผลต่อแรงตึงผิวและความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมระหว่างกระบวนการผลิตโฟม แรงตึงผิวของของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดลงเมื่อเติมธาตุ Bi, Ca, Li, Mg, Pb, Sb, หรือ Sn ในทางกลับกัน ธาตุผสมอย่างเช่น เติม Ag, Cu, Fe, Ge, Mn, Si หรือ Zn จะเป็นการเพิ่มแรงตึงผิวของน้ำโลหะ รูปที่ 2.13 แสดงผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงตึงผิว



รูป 2.13 ผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงตึงผิว [22]

ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมธาตุ เติม Cu, Fe และ Ti ในทางตรงกันข้ามความหนืดน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดลงเมื่อเติมธาตุ Mg และ Si ส่วน Zn มีผลต่อความ

หนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.14 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม



รูป 2.14 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [22]

2.7 การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม

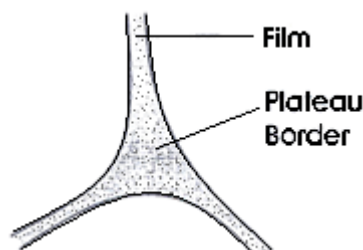
ในกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระหว่างการขยายตัวของโฟมนั้นมีทั้งประโยชน์และโทษ เช่น การขยายตัวของโฟมทำให้โพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น การยุบและรวมตัวกันของโพรงอากาศ หรือการพังตัวของโพรงอากาศ เป็นต้น

จากการศึกษาของ BanHart J. [23] สามารถสรุปแรงที่กระทำต่อโฟมโลหะระหว่างการขยายตัวได้ดังนี้

- Gravitational sedimentation (Drainage) คือ การไหลของน้ำโลหะเหลวไปที่ฐานของโฟม เนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก

- การบางลงของผนังโพรงอากาศเนื่องจากแรงแคปิลลารี (Capillarity-driven cell wall thinning) เกิดเนื่องจากการไหลของน้ำโลหะเหลวจากบริเวณผนังโพรงอากาศไปยังบริเวณ Plateau border เนื่องจากผลของความแตกต่างระหว่างแรงดึงผิวของทั้ง 2 บริเวณ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างบริเวณทั้ง 2 ดังรูปที่ 2.15 แสดงภาพบริเวณ Plateau border

- Interbubble gas diffusion เกิดจากความแตกต่างของความดันแก๊สระหว่างโพรงอากาศที่มีขนาดต่างๆกัน



รูปที่ 2.15 บริเวณ Plateau border (24)

ปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีผลทำให้โฟมโลหะที่ผลิตได้ไม่มีเสถียรภาพ เช่น เกิดการขยายขึ้นของโพรงอากาศ (Coarsening), การผสานรวมกันของโพรงอากาศ (Cell coalescence) และการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศ (Cell wall rupture) เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่าการสร้างเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้โดย

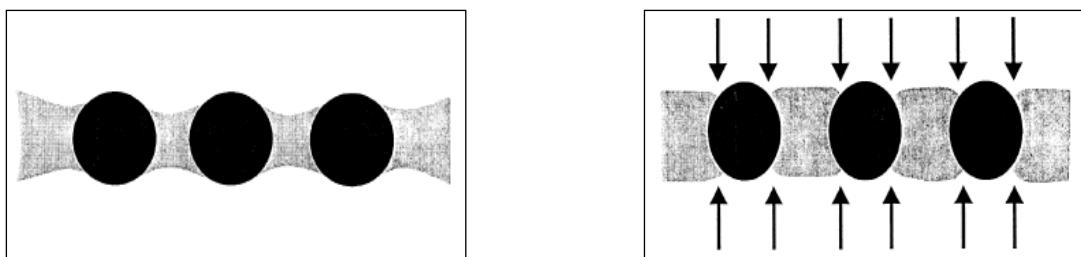
1. เพิ่มความหนืดให้กับน้ำโลหะ
2. เพิ่มความหนืดให้กับผนังโพรงอากาศ และผนังของ Plateau borders
3. การลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะ

การเพิ่มอนุภาคของแข็งเข้าไปในชิ้นงาน Precursor เป็นหนึ่งในวิธีการเพิ่มเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียมเนื่องจากอนุภาคของแข็งจะไปขัดขวางการไหลของน้ำโลหะทำให้น้ำโลหะมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การมีอนุภาคของแข็งไปอยู่ที่บริเวณรอยต่อของแก๊สและของเหลวยังส่งผลทำให้ความโค้งของผนังโพรงอากาศลดลง ทำให้ความแตกต่างของค่า Capillary pressure ระหว่างบริเวณ Plateau border และผนังโพรงอากาศลดลง ทำให้การเกิด Drainage ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.16

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

รูปที่ 2.16 แสดงผลของอนุภาคของแข็งต่อการลดลงของ Capillary pressure [24]

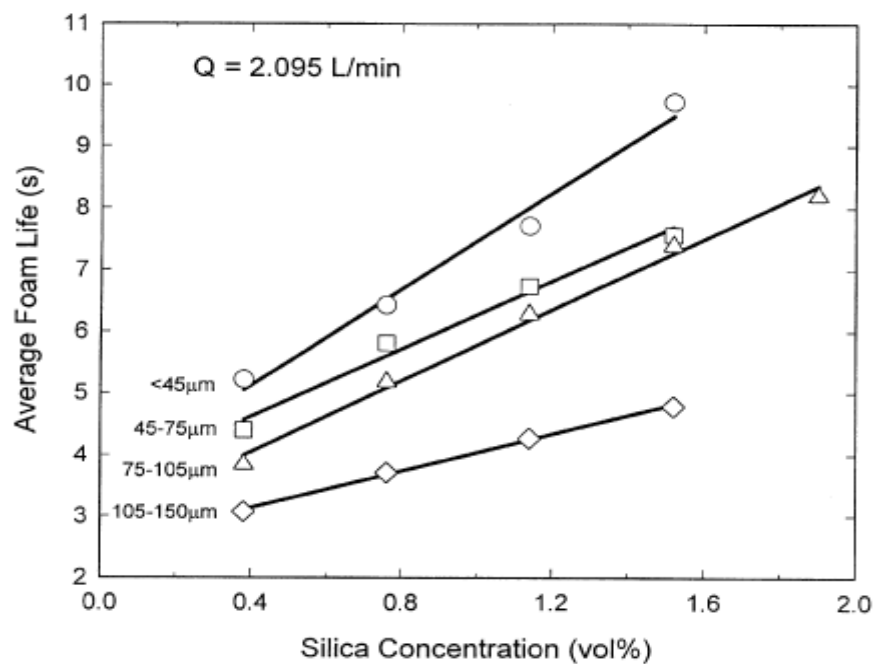
ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกตัวอนุภาคคือความสามารถในการเปียก (Wettability) อนุภาคที่มีสมบัติเปียกกับน้ำโลหะจะช่วยเพิ่มความหนืดผิวให้กับน้ำโลหะได้ อนุภาคที่มีสมบัติเปียกที่ดีจะยึดติดกับน้ำโลหะและทำให้น้ำโลหะสามารถคงตัวได้นาน ดังรูปที่ 2.17 ก ทำให้การพังตัวของโพรงอากาศเกิดช้าลง ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากอนุภาคมีสมบัติเปียกไม่ดี น้ำโลหะไม่สามารถยึดตัวติดกับอนุภาคได้ ทำให้เกิดการพังตัวของโพรงอากาศอย่างรวดเร็ว [1] ดังรูปที่ 2.17 ข



รูปที่ 2.17 (ก) อนุภาคที่มีสมบัติเปียกที่ดีและ (ข) อนุภาคที่มีสมบัติเปียกไม่ดี [24]

นอกจากนี้ขนาด ปริมาณ และรูปร่างของอนุภาคที่เติมลงไปในโฟมอะลูมิเนียมยังมีผลต่อเสถียรภาพของโฟมด้วย [7, 25] โดยส่งผลต่อกลไกในการเพิ่มความหนืดของโฟม ซึ่งจะช่วยให้ลดการไหลของน้ำโลหะไปยังฐานโฟมและลดการบางลงของโพรงอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลดการเกิดความแตกต่างของความหนาแน่น และการขยายขึ้นของโพรงอากาศซึ่งเกิดจากการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศที่บางลงได้ รูปที่ 2.18 แสดงผลของขนาดและปริมาณของซิลิกา (SiO₂) ที่เติมเข้าไปต่อ

ความเสถียรของฟองแก๊สในน้ำ จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณอนุภาคเท่ากัน ฟองแก๊สจะสามารถอยู่ได้นานขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง เนื่องจากเมื่ออนุภาคเล็กลง จะมีจำนวนอนุภาคและพื้นที่ผิวโดยรวมของอนุภาคมากขึ้น จำนวนอนุภาคที่ไปเกาะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฟองแก๊สและน้ำจึงเพิ่มขึ้น ช่วยให้ฟองแก๊สแข็งแรงขึ้นและยับยั้งการไหลของน้ำให้น้อยลง ทำให้ฟองแก๊สอยู่ได้นานขึ้น เช่นเดียวกันที่ขนาดของอนุภาคเท่ากัน ฟองแก๊สจะสามารถอยู่ได้นานขึ้นหากปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดของเหลวเพิ่มขึ้น ความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้อัตราการไหลของน้ำช้าลงและยับยั้งการพังตัวของฟองแก๊ส [24]



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงผลของขนาดและปริมาณอนุภาคที่มีต่อเสถียรภาพของฟองแก๊สในน้ำ [24]

2.8 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

2.8.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

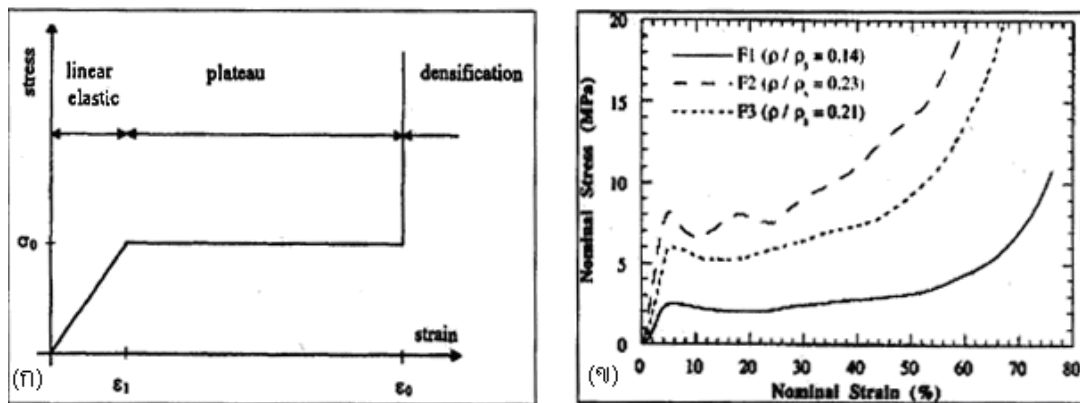
โฟมอะลูมิเนียมจะมีขั้นตอนการผิดรูปภายใต้แรงอัดอยู่ 3 ช่วง ได้แก่

1. ช่วงการผิดรูปแบบยืดหยุ่น (Linear elastic) เป็นช่วงที่ค่าความชันของกราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าคงที่ ในระยะแรงที่โฟมได้รับแรงกระทำ ค่าความเครียดยังมีค่าน้อย จะเกิดการงอ ยืดตัวและอัดตัวของก้านและผนังโพรงอากาศ จนกระทั่งค่าความเค้นที่เกิดกับก้านและผนังโพรงอากาศมีค่าเกินค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength) ของอะลูมิเนียมจะเกิดการผิดรูปแบบถาวรขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในโครงสร้างของโฟมเป็นโครงสร้างโพรงอากาศที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้เกิดค่าความเข้มข้นความเค้น (Stress concentration) ที่บางจุดของโฟมมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นจุดครากและเกิดการผิดรูปแบบถาวรขึ้น ดังนั้นการเกิดการผิดรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นที่แท้จริงจึงเกิดขึ้นได้ยาก

2. ช่วงการผิดรูปบริเวณที่ราบ (Plateau regime) เป็นช่วงที่ค่าความเค้นมีค่าเกือบคงที่ในขณะที่ค่าความเครียดเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดจากการเกิดแถบการผิดรูป (Deformation band) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับทิศของแรงกระทำที่การผิดรูปแบบพลาสติกเกิดขึ้น โพรงอากาศที่เกิดการผิดรูปแบบพลาสติกจะส่งผลให้โพรงอากาศข้างเคียงรับแรงได้น้อยลงจนเกิดเกิดการพังในที่สุดและเมื่อเกิดแถบการผิดรูปต่อเนื่องก็จะเกิดการผิดรูปในบริเวณที่ราบต่อเนื่องที่ระดับความเค้นค่อนข้างคงที่จนกระทั่งเข้าสู่การผิดรูปในช่วงสุดท้าย

3. ช่วงการผิดรูปแบบอัดแน่น (Densification) เป็นช่วงที่ค่าความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วต่อค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมทั้ง 3 ช่วง แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟความเค้นความเครียดแสดงช่วงการผิครูป 3 แบบ (ก) โฟมในอุดมคติ (ข) โฟมโลหะ ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ [26]

สำหรับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโฟมภายใต้แรงอัด มีทั้งการเปลี่ยนรูปของโครงอากาศแบบยืดหยุ่น และแบบพลาสติก สำหรับการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นนั้น L. J. Gibson [27] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัดส่วนมอดุลัสของโฟมกับของแข็ง ($\frac{E^*}{E_s}$) กับค่าสัดส่วนความหนาแน่นของโฟมกับของแข็ง

($\frac{\rho^*}{\rho_s}$) ดังสมการที่ (2.3)

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

โดยที่ E^* คือ ค่า Young's modulus ของโฟม

E_s คือ ค่า Young's modulus ของของแข็ง

ρ^* คือ ค่าความหนาแน่นของโฟม

ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง

C_1, C_1' คือ ค่าคงที่ มีค่าประมาณ 0.32

พฤติกรรมการผิดรูปในช่วงพลาสติกภายใต้แรงอัด ได้ถูกแสดงไว้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการผิดรูปแบบพลาสติกของโฟมกับของแข็ง $\left(\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}}\right)$ กับค่าสัดส่วนความหนาแน่นของโฟมกับของแข็ง $\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$ ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2} + C'_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (2.4)$$

โดยที่ σ_{pl}^* คือ ค่าความเค้นของการผิดรูปแบบพลาสติกของโฟม
 σ_{ys} คือ ค่าความเค้นของการผิดรูปแบบพลาสติกของของแข็ง
 C_3, C'_3 คือ ค่าคงที่ มีค่า $C_3 = 0.33$ และ $C'_3 = 0.44$

สำหรับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีค่า $E_s = 70 \text{ GPa}$, $\sigma_s = 300 \text{ MPa}$ และ $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$

2.8.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม

โฟมอะลูมิเนียมมีสมบัติที่โดดเด่นด้านการดูดซับพลังงาน เนื่องจากโฟมมีช่วงค่าความเค้นระนาบที่กว้าง ความเค้นระนาบจะเป็นตัวที่บอกถึงพลังงานทั้งหมดที่โฟมสามารถดูดซับได้ อย่างไรก็ดีตามเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดต่อบุคคลหรือทรัพย์สิน แรงกระแทกจะต้องมีค่าไม่เกินค่าระดับหนึ่ง ความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ได้อย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ แต่ค่าความเค้นระนาบจะต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสมด้วย [1]

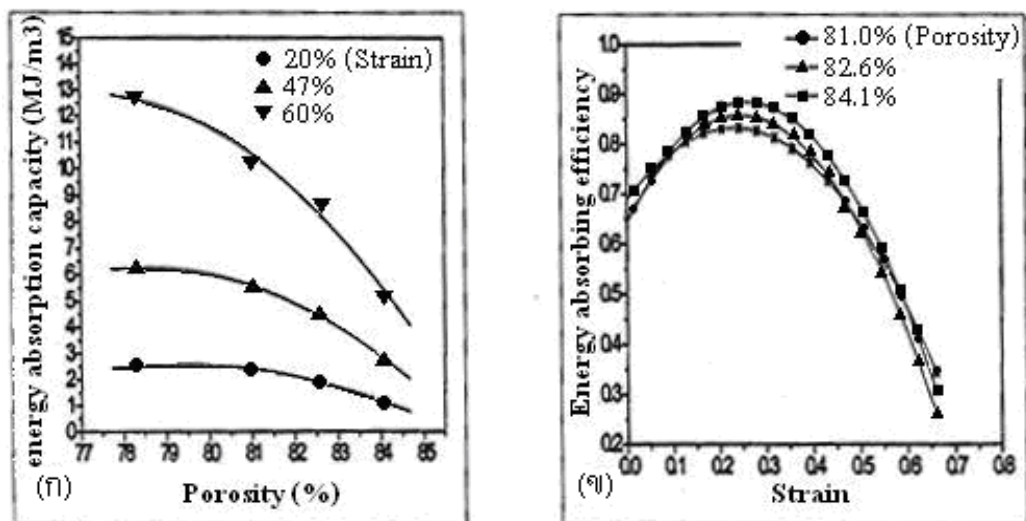
ความสามารถในการดูดซับพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (E_v) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียด ดังสมการ (2.5) ดังนี้

$$E_v = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.5)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้น (MPa)

\mathcal{E} คือ ความเครียด

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมมีหลายปัจจัยเช่น ปริมาณโพรงอากาศ ปริมาณธาตุผสม ระดับความเครียดที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 2.20 ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg0.45 จากกราฟพบว่าที่ระยะความเครียดเท่ากันความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมจะสูงขึ้นถ้าความพรุนของโฟมน้อยลง อีกด้านหนึ่งหากพิจารณาที่ค่าความพรุนเท่ากันความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมจะสูงขึ้นเมื่อระยะความเครียดเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานยังขึ้นกับความเครียดอีกด้วย รูป 2.20 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานกับความเครียด



รูปที่ 2.20 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับความพรุนของโฟมอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg0.45 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานกับความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg0.45 [28]

2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะ

- ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ โฟมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงจะมีความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับพลังงานมากกว่าโฟมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำกว่า

เนื่องจากโคมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงจะมีโพรงอากาศน้อยและมีเนื้อโลหะมากกว่าโคมโลหะที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำกว่า [1]

- ขนาดของโพรงอากาศ ถ้าโพรงอากาศมีขนาดเล็ก ผนังโพรงอากาศจะมีความหนาแน่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโคมที่มีโพรงอากาศใหญ่กว่า ทำให้มันสามารถรับแรงอัดก่อนเกิดการผิดรูปถาวรและแตกหักได้มากกว่า โคมที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่และมีผนังโพรงอากาศบางเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเท่ากัน จะเกิดรอยพับและรอยแตกได้ง่ายกว่าเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นความเค้นมาก ดังนั้นการควบคุมขนาดของโพรงอากาศที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของโคมได้ [1]

- รูปร่างของโพรงอากาศ โพรงอากาศที่มีลักษณะกลมจะมีความแข็งแรงมากกว่าโพรงอากาศที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากโพรงอากาศที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอจะเกิดความเข้มข้นความเค้นสูงบริเวณที่เป็นมุม ทำให้เกิดการแตกหักเสียหายได้ง่ายกว่า [1]

- การกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศ โคมโลหะที่มีการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศน้อย จะมีความแข็งแรงอัดและการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าโคมที่มีการกระจายตัวของขนาดโพรงอากาศมาก เนื่องจากโคมที่มีขนาดโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอเมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดความไม่สมดุลของแรงกระจายทั่วบริเวณ โครงสร้างของโคม ส่งผลทำให้โคมรับแรงกระทำและดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า [1]

- ทิศทางของโพรงอากาศ โคมโลหะที่ได้รับแรงกระทำในทิศทางขนานกับทิศทางในการผลิตโคม จะมีความแข็งแรงอัดมากกว่าโคมที่ได้รับแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับทิศการผลิต ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นที่ที่รับแรงในแนวขนานกับทิศในการผลิต โคมมีปริมาณน้อยกว่า ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงกว่าเมื่อขนาดของแรงเท่ากัน นอกจากนี้ระยะการผิดรูปของโพรงอากาศในแนวขนานกับโคมยังมีค่ามากกว่า ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานดีกว่าอีกด้วย [1]

- อัตราความเครียด เมื่อโคมโลหะให้รับแรงกระทำที่อัตราความเครียดต่ำจะเกิดการโก่งงอของผนังโพรงอากาศขึ้น ซึ่งเป็นกลไกปกติของการผิดรูปของโคมโลหะ อย่างไรก็ตาม หากโคม

โลหะได้รับแรงกระทำที่อัตราความเครียดสูง การโก่งของผนังโพรงอากาศจะถูกต้านไว้โดยแรงเฉื่อยของผนังโพรงอากาศ ซึ่งจะทำให้ความเค้นจุดครากของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ระหว่างที่ได้รับแรงกระทำ แก๊สที่ไหลผ่านระหว่างโพรงอากาศผ่านทางตำหนิของโพลีเมอร์จะทำให้ความดันภายในโพรงอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความเครียดเฉพาะที่ขึ้น ความเค้นระนาบและการดูดซับพลังงานจึงสูงขึ้น [1]

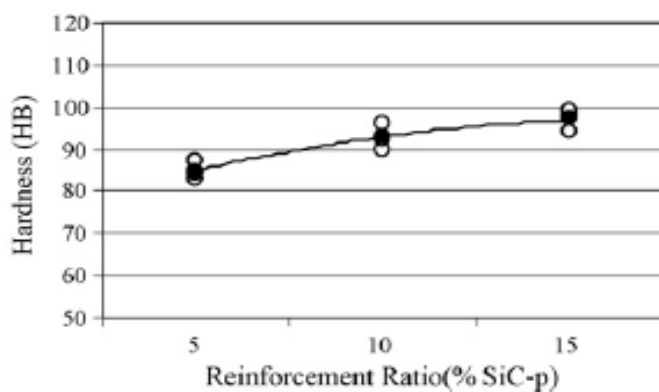
- ตำหนิในโพลีเมอร์ ตำหนิในโพลีเมอร์โลหะส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นระหว่างการผลิต เช่น การบิดเบี้ยวของผนังโพรงอากาศ ความไม่สม่ำเสมอของผนังโพรงอากาศ การเกิดรอยหรือช่องว่างของผนังโพรงอากาศ การผิดรูปของผนังโพรงอากาศ ตำหนิเหล่านี้จะทำให้โพลีเมอร์มีความแข็งแรงลดลง และจะเป็นจุดเริ่มต้นของการผิดรูปเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด [1]

2.9 วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ

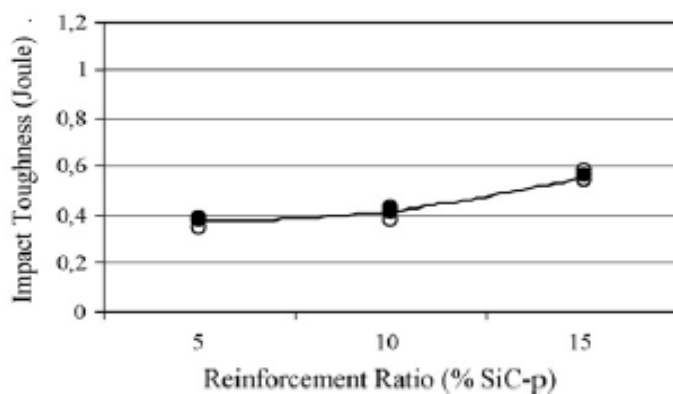
โลหะสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยการเติมอนุภาคของแข็งขนาดเล็กในปริมาณที่มากเพียงพอและมีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอเต็มเนื้อพื้น อนุภาคดังกล่าวจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับเนื้อพื้น ส่วนใหญ่จะนิยมใช้วัสดุเซรามิก เช่น วัสดุผงออกไซด์ วัสดุผสมที่ได้จะมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุเนื้อพื้น ไม่ว่าจะเป็น ความแข็งแรง ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ความเหนียว โดยปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมจะขึ้นกับขนาดของอนุภาค สัดส่วน โดยปริมาตรของอนุภาค ชนิดของวัสดุเนื้อพื้น การกระจายตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาระหว่างเนื้อพื้นกับอนุภาค นอกจากสมบัติทางกลแล้ว การเติมอนุภาคของแข็งอาจสามารถช่วยลดความหนาแน่นของวัสดุอีกด้วย ถ้าหากความหนาแน่นของอนุภาคเสริมแรงนั้นๆ มีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้น

กลไกการเสริมแรงของวัสดุผสมเกิดจากผงอนุภาคที่อยู่ในเนื้อพื้น ยับยั้งการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเนื้อพื้นเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่งผลให้แรงกระทำถูกส่งผ่านเนื้อพื้นไปยังผงได้ในปริมาณหนึ่ง อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นมากเท่าไรขึ้นอยู่กับความยึดเกาะระหว่างเนื้อพื้นกับผง ณ บริเวณรอยต่อ

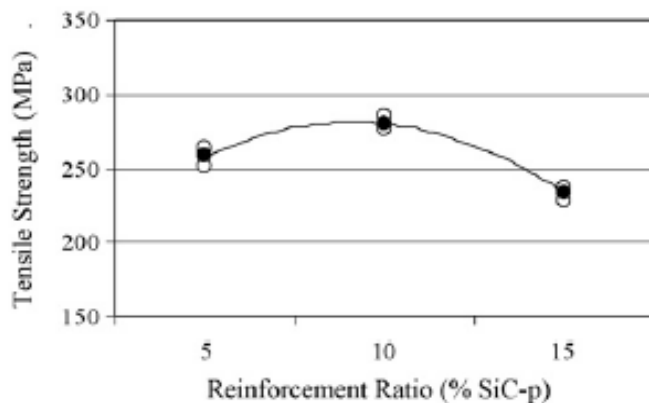
วัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมได้รับความนิยมนและใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมันมีคุณสมบัติที่ดีมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมทั่วไป อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาเหมาะสำหรับใช้ในงานด้านการขนส่ง อนุภาคเสริมแรงตัวที่ได้รับความนิยมอย่างมากคือซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งอะลูมิเนียมได้รับการเสริมแรงแล้วจะมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน [32] ดังแสดงในรูปที่ 2.21, 2.22 และ 2.23



รูปที่ 2.21 แสดงกราฟความแข็งแบบ Brinell ของอะลูมิเนียมอัลลอย AlSi7Mg2 เสริมแรงด้วย SiC-p ที่ปริมาณต่างๆ [35]



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟค่าความแกร่งของอะลูมิเนียมอัลลอย AlSi7Mg2 เสริมแรงด้วย SiC-p ที่ปริมาณต่างๆ [35]



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความแข็งแรงของอะลูมิเนียมอัลลอย AISi7Mg2 เสริมแรงด้วย SiC-p ที่ปริมาณต่างๆ [35]

อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์คือมีราคาแพง จึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะค้นหาวัสดุที่มีราคาถูกและคุณภาพดีมาทดแทนวัสดุเดิมเพื่อลดต้นทุนการผลิต

2.9.1 รอยต่อระหว่างเนื้อพื้นและตัวเสริมแรง

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมคือพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุเนื้อพื้นและตัวเสริมแรง เนื่องจากแรงที่กระทำต่อวัสดุจะถูกส่งไปยังตัวเสริมแรงผ่านทางรอยต่อระหว่างวัสดุเนื้อพื้นและตัวเสริมแรง ถ้าพันธะที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงมาก จะทำให้ตัวเสริมแรงแสดงคุณสมบัติได้อย่างเต็มที่เนื่องจากแรงถูกส่งผ่านไปยังตัวเสริมแรงได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้พฤติกรรมการแตกหักของวัสดุผสมก็จะขึ้นกับความแข็งแรงระหว่างรอยต่ออีกด้วย ถ้าพันธะระหว่างรอยต่อไม่แข็งแรงจะส่งผลให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงและมอดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำแต่จะมีความต้านทานต่อการแตกหักสูง ถ้าพันธะระหว่างรอยต่อมีความแข็งแรงสูงจะส่งผลให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงและมอดูลัสยืดหยุ่นสูงแต่ความต้านทานการแตกหักต่ำ [32]

การยึดติดระหว่างเนื้อพื้นและตัวเสริมแรงที่ดีจะต้อง

1. ไม่มีช่องว่างระหว่างรอยต่อ
2. มีพันธะยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง

3. ไม่มีการปนเปื้อนของสารอื่น

2.9.2 กฎแห่งการผสม

สมบัติและสัดส่วนของวัสดุเนื้อพื้นและวัสดุเสริมแรงมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุผสม สมการที่สามารถนำไปหาค่าคุณสมบัติของวัสดุผสมเรียกกันว่า “กฎแห่งการผสม” ดังแสดงในสมการที่ (2.6)

$$X_c = X_m \mathbf{v}_m + X_f \mathbf{v}_f \quad (2.6)$$

โดยที่ X_c คือ สมบัติของวัสดุผสม
 X_m คือ สมบัติของวัสดุเนื้อพื้น
 X_f คือ สมบัติของวัสดุเสริมแรง
 \mathbf{v}_m คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุเนื้อพื้น
 \mathbf{v}_f คือ สัดส่วนปริมาตรของตัวเสริมแรง

สมการดังกล่าวสามารถนำไปหาสมบัติของวัสดุได้แก่ ความหนาแน่นและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นได้ อย่างไรก็ตามสมบัติของวัสดุผสมไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามกฎแห่งการผสมเสมอไป เนื่องจากสมบัติของวัสดุผสมส่วนใหญ่ไม่ได้แปรผันในเชิงเส้นตรงกับสัดส่วนโดยปริมาตร แต่จะอยู่ในรูปฟังก์ชันที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุเนื้อพื้นและวัสดุเสริมแรงยังคงเป็นตัวแปรที่มีผลอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุผสม [32]

2.10 จี้ออกจากโรงไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยยังมีการใช้ถ่านหิน (ลิกไนต์) เป็นเชื้อเพลิงหลัก ผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินจะเป็นของเสียซึ่งอยู่ในรูปของกากจี้อัดซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้เป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจากจี้อัดที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูกและมีปริมาณมาก และยังเป็นการหมุนเวียนของเสียที่ไม่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ จี้อัดจากโรงไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็นประเภทได้ดังนี้

2.10.1 จี้อัดเปียก

เป็นจี้อัดที่ตกลงสู่เบื้องล่างเมื่อมีการเผาไหม้ถ่านหิน มีปริมาณคิดเป็น 20 – 40 % ของปริมาณจี้อัดทั้งหมดโดยประมาณ ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำไปฝังกลบ แต่ในปัจจุบันมีการคิดค้นวิธีการนำจี้อัดเปียกกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น นำมาใช้ในงานก่อสร้างโดยผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มสมบัติทางกล เป็นต้น

2.10.2 จี้อัดลอย

จี้อัดลอยคือจี้อัดที่ลอยไปกับแก๊สต่างๆเมื่อมีการเผาไหม้ถ่านหินและถูกดักจับโดยเครื่องกรองฝุ่น มีปริมาณคิดเป็น 60 - 80 % ของจี้อัดทั้งหมดโดยประมาณ ในปัจจุบันมีการค้นพบว่าจี้อัดลอยสามารถนำไปใช้เป็นอนุภาคเสริมแรงสำหรับอะลูมิเนียมได้ [29]

2.11 คุณลักษณะและการนำไปใช้งานของจี้อัด

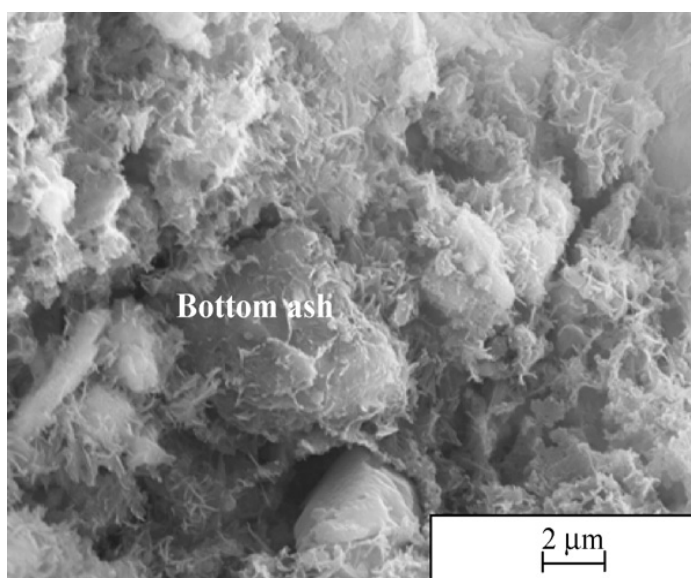
2.11.1 จี้อัดเปียก

จี้อัดเปียกประกอบไปด้วยสารประกอบออกไซด์หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าเปียกที่ได้จากโรงไฟฟ้า Tunçbilek ประเทศตุรกี [33]

สารประกอบออกไซด์	ปริมาณโดยมวล (wt.%)
SiO ₂	54.5
Al ₂ O ₃	15.4
Fe ₂ O ₃	11.6
CaO	4.69
MgO	4.26
SO ₃	1.30
K ₂ O	1.34
LOI	8.90

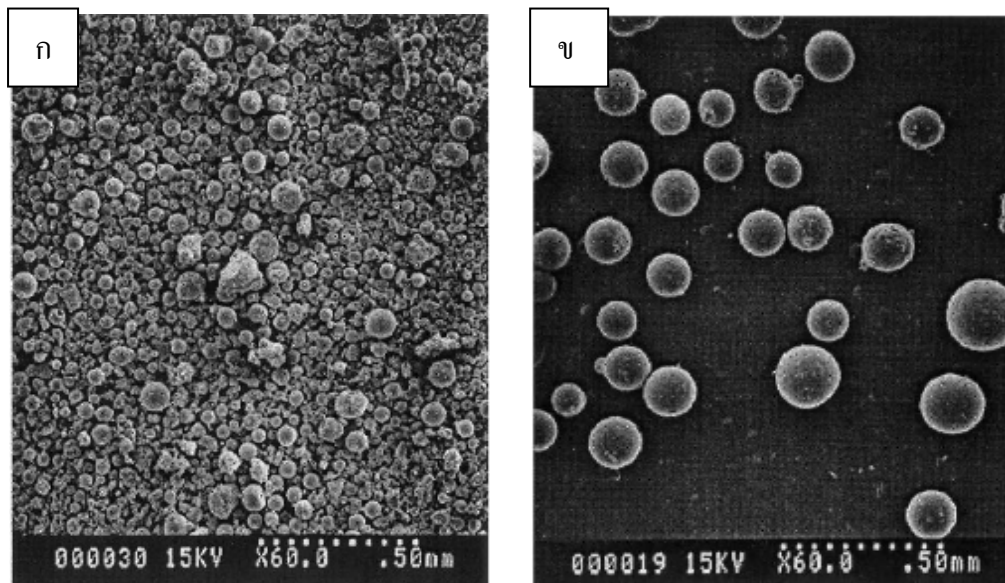
สำหรับการนำไปใช้งานของขี้เถ้าเปียก ส่วนใหญ่จะนำไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและช่วยลดน้ำหนักของคอนกรีต รูปที่ 2.24 แสดงการฝังตัวของอนุภาคขี้เถ้าเปียกภายในคอนกรีต



รูปที่ 2.24 SEM ขี้เถ้าเปียกภายในคอนกรีต [33]

2.11.2 จี้อัลลอย

จี้อัลลอยสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Precipitator และ Cenosphere ซึ่งจี้อัลลอยชนิด Precipitator จะมีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลมตัน (รูปที่ 2.25 ก) มีความหนาแน่นประมาณ 2.0-2.5 g/cm³ สามารถนำไปใช้เป็นอนุภาคเสริมแรงในวัสดุผสมเพื่อเพิ่มสมบัติด้านต่างๆได้ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการสึกหรอ ในส่วนของจี้อัลลอยชนิด Cenosphere จะมีรูปร่างลักษณะแบบทรงกลมกลวง(รูปที่ 2.25 ข) มีความหนาแน่นต่ำประมาณ 0.4-0.7 g/cm³ จี้อัลลอยชนิดนี้มีการศึกษานำมาใช้ในการผลิตเป็นวัสดุผสมเนื้อพื้น โลหะน้ำหนักเบา (Ultra-light composite materials) [34]



รูปที่ 2.25 (ก) SEM จี้อัลลอยแบบ Precipitator ขนาด 75-106 μm (ข) SEM จี้อัลลอยแบบ Cenosphere ขนาด 106-150 μm [34]

ส่วนประกอบทางเคมีจี้อัลลอยประกอบไปด้วยสารประกอบออกไซด์ต่าง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์ที่ได้ออกจากโรงไฟฟ้า Raichur ประเทศอินเดีย [30]

สารประกอบออกไซด์	ปริมาณ (%)
SiO ₂	64.80
Al ₂ O ₃	24.01
Fe ₂ O ₃	5.23
CaO	2.76
MgO	0.90
TiO ₂	0.50
LOI	0.87-1.33

*LOI สูญเสียระหว่างการเผาไหม้

ส่วนประกอบทางเคมีและลักษณะทางโครงสร้างของซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของตัวมันเอง ภายในอนุภาคซีเมนต์ประกอบด้วยโครงสร้างทั้งแบบผลึก (Crystal) และแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งสัดส่วนของโครงสร้างแบบผลึกและแบบอสัณฐานของซีเมนต์ชนิด Precipitator และแบบ Cenosphere จะมีปริมาณแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนโดยปริมาตรของโครงสร้างผลึก Quartz และ Mullite ในซีเมนต์ชนิด Precipitator [34]

ขนาดอนุภาค (μm)	ปริมาณผลึก (vol.%)	Quartz (vol.%)	Mullite (vol.%)
150-250	38	5	33
75-100	26	3	23
45-75	26	3	23
20-45	23	3	20
5-10	17	2	16

ตารางที่ 2.4 สัดส่วนโดยปริมาตรของโครงสร้างผลึก Quartz และ Mullite ในซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere [34]

ขนาดอนุภาค (μm)	ปริมาณผลึก (vol.%)	Quartz (vol.%)	Mullite (vol.%)
150-250	16	0	16
100-150	21	1	20
75-100	22	1	21
45-75	29	1	28

จากตารางข้างต้น สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสโครงสร้างผลึกในซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator จะมีปริมาณแปรผันตามขนาดของอนุภาค สาเหตุอาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันของอนุภาคขนาดเล็กและอนุภาคขนาดใหญ่ อนุภาคขนาดเล็กจะเย็นตัวได้เร็วกว่าเนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้อนุภาคขนาดเล็กสามารถเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็ว จนโครงสร้างผลึกเกิดได้น้อย ในทางกลับกันอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งอัตราการเย็นตัวต่ำกว่าจึงมีเวลาให้เกิดการตกผลึกขึ้นได้ [34]

ในส่วนของซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลึกจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม นั่นคือสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสโครงสร้างผลึกจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค สาเหตุอาจเกิดจากความหนาของผนังอนุภาคที่บางลงเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น การบางลงของผนังอนุภาคนี้ทำให้อัตราการเย็นตัวเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างแบบอสัณฐานได้มากขึ้น [34]

2.12 วัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซีเมนต์ลอย

จากข้อจำกัดด้านต้นทุนของวัสดุผสมซึ่งอนุภาคเสริมแรงมักมีราคาแพง จึงได้มีการศึกษาวิจัยและค้นหาวัสดุราคาถูกเพื่อนำมาใช้เป็นอนุภาคเสริมแรง ซีเมนต์ลอยเป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูกและมีปริมาณมาก เป็นของเสียที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า ดังนั้นซีเมนต์ลอยจึงอาจเป็นวัสดุที่ก้าวข้ามข้อจำกัดทางด้านราคาและอาจนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ [30]

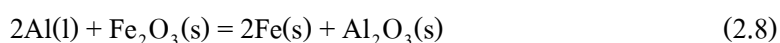
จากการศึกษาของ Sudarshan และ M.K. Surappa [30] พบว่า อะลูมิเนียมเกรด A356 เสริมแรงด้วยอนุภาคซีเถ้าลอย ให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าอะลูมิเนียมที่ไม่ได้รับการเสริมแรง ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลของอะลูมิเนียม A356 เสริมแรงด้วยซีเถ้าลอยที่ปริมาณต่างๆ [30]

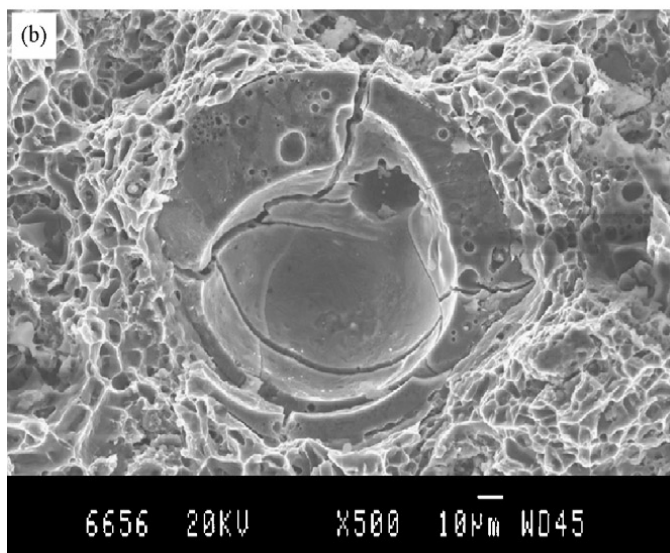
Material	0.2 % proof stress (MPa)		Ultimate strength (MPa)		% elongation in tention
	Tension	Compression	Tension	Compression	
A 356 Al	83	90	165	458	24
C6(S)	101	104	194	548	21
C12(S)	108	109	145	427	13
C12(AR)	91	107	142	417	10

จากตารางข้างต้น อะลูมิเนียมผสม A356 เสริมแรงด้วยซีเถ้าลอยที่ทุกส่วนผสม จะมีความเค้นพิสูจน์(0.2% Proof stress) สูงกว่าอะลูมิเนียมที่ไม่ได้รับการเสริมแรง ในส่วนของความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้(UTS) พบว่าอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซีเถ้าลอย 6% โดยปริมาตรจะให้ความแข็งแรงสูงสุด รองลงมาคืออะลูมิเนียมที่ไม่ได้รับการเสริมแรงและอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซีเถ้าลอย 12% โดยปริมาตรตามลำดับ สาเหตุที่อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซีเถ้าลอย 12% โดยปริมาตร มีความแข็งแรงต่ำกว่าตัวอื่นเนื่องจากรูพรุนในชิ้นงานและเกิดปฏิกิริยาระหว่างเนื้อพื้นและอนุภาคซีเถ้าทำให้มีเฟสที่เปราะเกิดขึ้นมากเกินไป

การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิก แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเนื้อพื้นซึ่งเป็นอะลูมิเนียมและซีเถ้าลอยซึ่งประกอบไปด้วย อะลูมินา ซิลิกา และเหล็กออกไซด์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



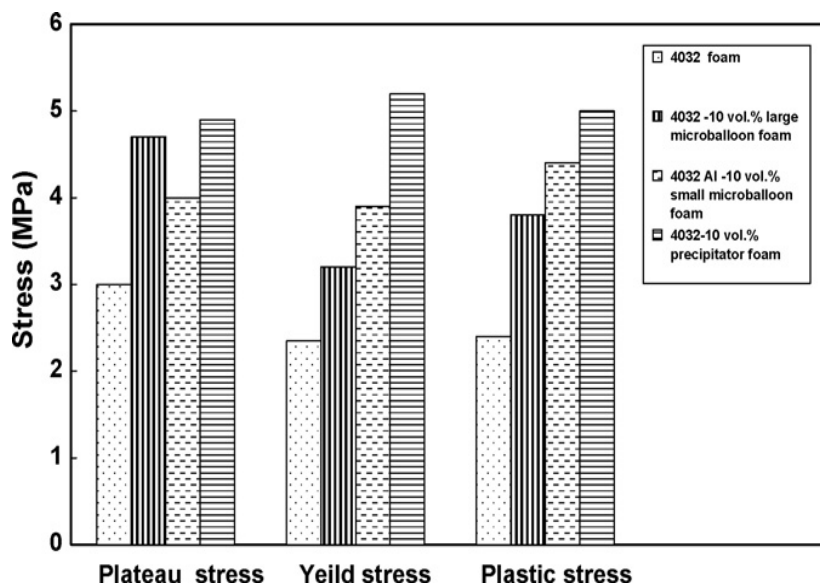
ธาตุ Si และ Fe ที่เกิดขึ้นจะเกิดเป็นสารผสมกับเนื้อพื้น การเกิดปฏิกิริยาเคมีดังกล่าว ส่งผลต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุเนื่องจากเฟสที่เกิดขึ้นใหม่จะเป็นเฟสที่เปราะ สัดส่วนระหว่างปริมาณเฟสเปราะและเฟสเหนียว (Matrix) จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้วัสดุมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ลดลงเมื่อปริมาณของซีเถ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเนื้อพื้นและอนุภาคยังส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมเช่นกัน การแตกหักของอนุภาคภายในชิ้นงานทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 2.26 บ่งบอกถึงพันธะที่แข็งแรงระหว่างเนื้อพื้นและอนุภาค



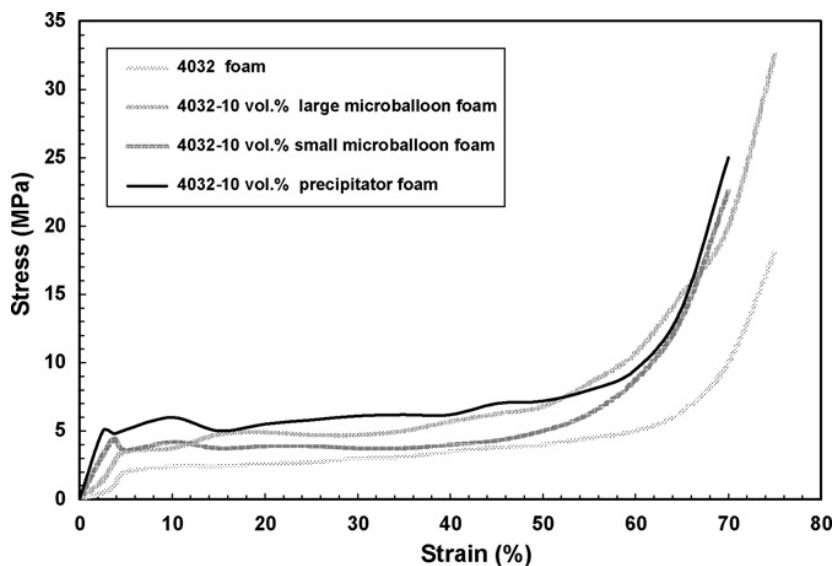
รูปที่ 2.26 การแตกของอนุภาคซีเถ้าลอยภายในชิ้นงานอะลูมิเนียม [30]

2.13 การใช้อนุภาคซีเถ้าลอยในโฟมอะลูมิเนียม

A. Daoud [31] ได้ศึกษาผลของการเติมซีเถ้าลอยที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม โดยการผสมซีเถ้าลอยทั้งชนิด Precipitator และ Cenosphere ในปริมาณ 10 % โดยปริมาตร กับน้ำโลหะอะลูมิเนียมเกรด 4032 โฟมอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซีเถ้าลอยทั้งชนิด Precipitator และ Cenosphere ให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้รับการเสริมแรงมากภายใต้การทดสอบแรงอัด ซึ่งจากการที่วัสดุมีค่ามอดูลัสสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.27 และ 2.28



รูปที่ 2.27 กราฟแสดง Plateau stress, Yield stress และ Plastic stress ของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ โฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 เสริมแรงด้วยซีเถ้าลอย [31]



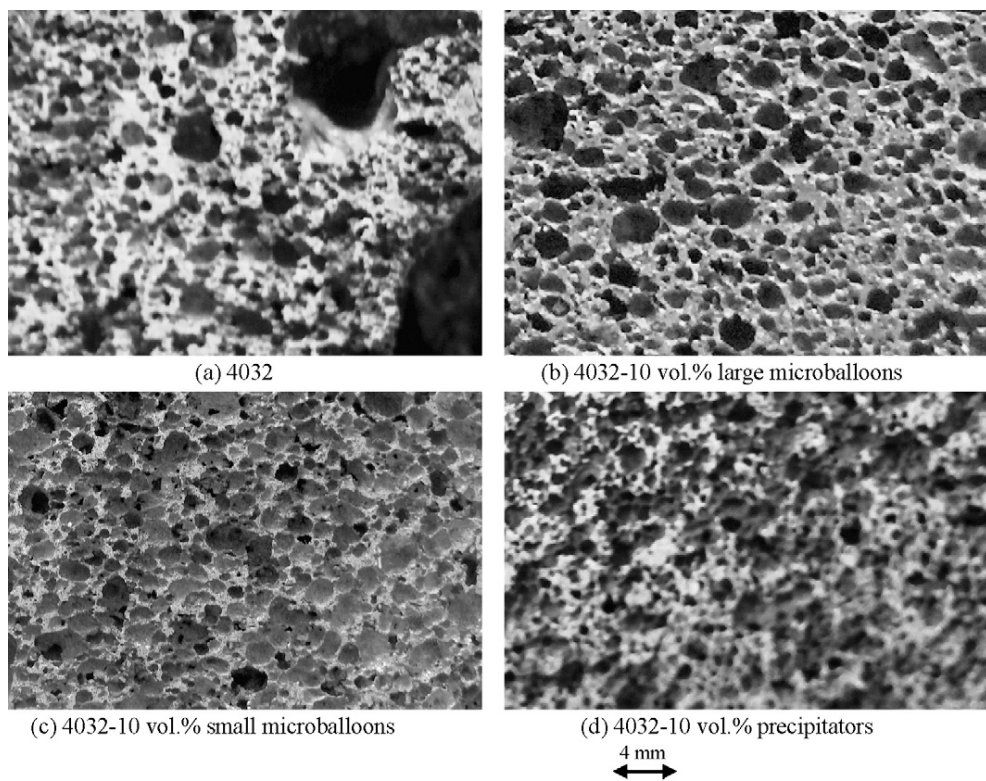
รูปที่ 2.28 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ โฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 เสริมแรงด้วยซีเถ้าลอย [31]

นอกจากนี้ยังพบว่าโฟมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซีเถ้าลอยชนิด Precipitators มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการกระแทกได้สูงสุด ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟม 4032 และ โฟม 4032 เสริมแรงด้วยซีเมนต์
ลอย [31]

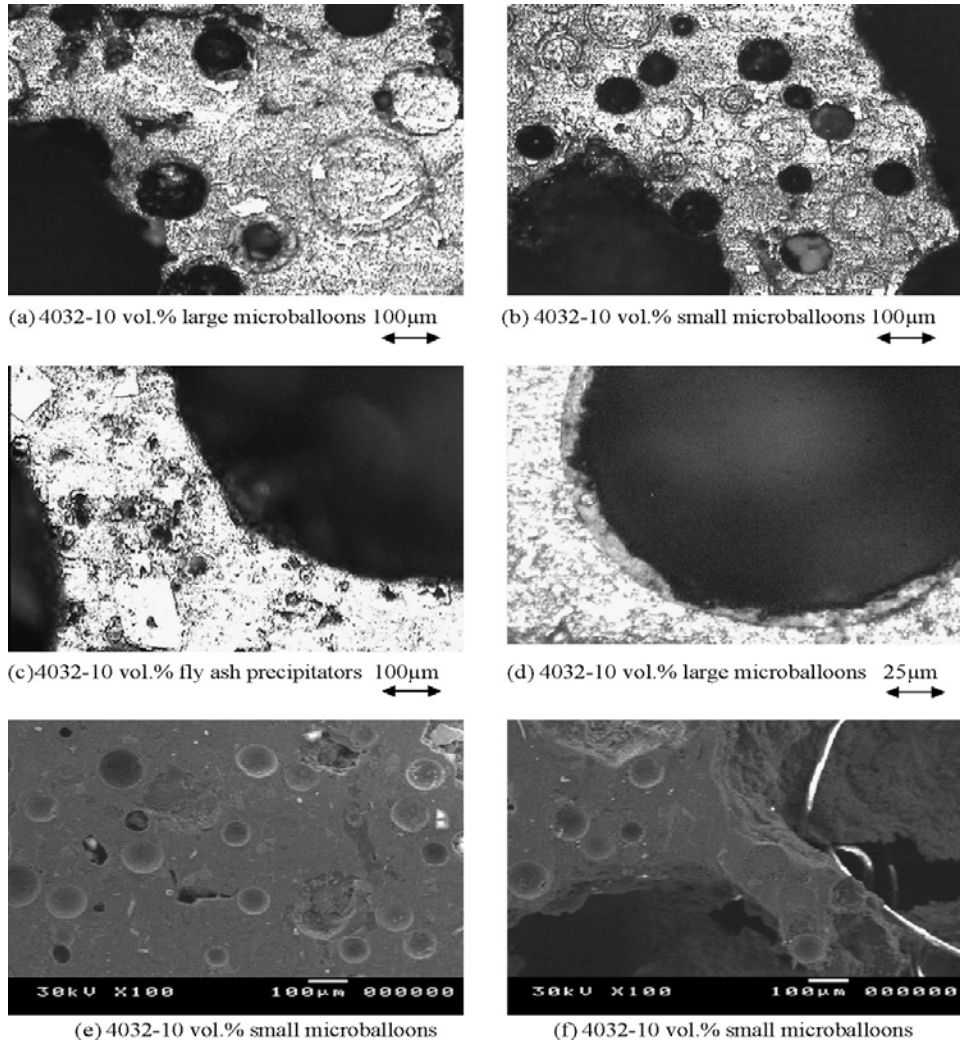
	4032	4032-10% ซีเมนต์ ลอยขนาดเล็ก	4032-10% ซีเมนต์ลอย ขนาดใหญ่	4032-10% ซีเมนต์ลอย
Energy absorption (MJ m^{-3})	1.76	2.55	2.74	3.1
Impact energy absorption (J)	3.07	2.5	3.04	3.4
Specific impact energy absorption ($\text{J.cm}^3 \text{g}^{-1}$)	4.6	4.3	5.33	5.77

การศึกษาโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ 4032 เสริมแรงด้วยซีเมนต์
ลอย พบว่าโฟมที่มีอนุภาคของซีเมนต์ลอยจะมีขนาดของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอกว่า ดังรูปที่ 2.29
โดยอนุภาคซีเมนต์ลอยจะไปขัดขวางการไหลของน้ำโลหะไปยังบริเวณ Plateau border ซึ่งจะช่วยลด
การพังตัวของผนังโพรงอากาศ [31]



รูปที่ 2.29 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ 4032 เสริมแรงด้วยซีเมนต์ลอย [31]

นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคซีเมนต์จะฝังตัวอยู่ตามบริเวณผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border และยังมีอนุภาคบางส่วนฝังตัวอยู่ตามรอยต่อของแก๊สและของเหลว ดังรูปที่ 2.30 ส่งผลให้รัศมีความโค้งหน้าสัมผัสเปลี่ยนไป ทำให้ความดันระหว่างผนังโพรงอากาศและ Plateau border ลดลง ทำให้อัตราการเกิด Drainage ลดลง



รูปที่ 2.30 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 และ โฟมอะลูมิเนียมเกรด 4032 เสริมแรงด้วยซีเมนต์ [31]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ผงอะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.7 % จาก Ecka Granules ประเทศออสเตรเลีย

3.1.2 ผงไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) ความบริสุทธิ์ 98 % จาก Acros organics

3.1.3 ขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.2 ตะแกรงร่อนคัดขนาด

3.2.3 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

3.2.4 เครื่องผสมผงโลหะแบบเขย่า

3.2.5 แบบขึ้นรูปชิ้นงาน Precursor ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร

3.2.6 เครื่องอัดไฮดรอลิก

3.2.7 เตาอบไล่ความชื้น

3.2.8 เตาอบชิ้นงาน ยี่ห้อ Protherm รุ่น PLF 140/9B

3.2.9 เครื่องทดสอบแรงดึงประตัก ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG – 100kNXplus

3.2.10 เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision cutting machine) ยี่ห้อ Struers รุ่น Accutom-5

3.2.11 สเปร์ยสีดำด้าน

3.2.12 เครื่องขัดชิ้นงาน

3.2.13 กระดาษทราย ผงเพชรและผ้าสักกะหลาดสำหรับขัดชิ้นงาน

3.2.14 เรซินชนิดใส

3.2.15 โปรแกรม Image J ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค

3.2.16 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD)

3.2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบคุณลักษณะของซีเมนต์จากโรงไฟฟ้า

3.3.1.1 การล้างสิ่งสกปรก

ซีเมนต์เปียก

ล้างด้วยผงซักฟอก 2 ครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำเปล่าจนกว่าน้ำจะใส เทน้ำออกให้หมด ก่อนที่จะนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ซีเมนต์ลอยแบบ Precipitators

ล้างด้วยน้ำเปล่า โดยผสม Fly ash 1 ส่วนต่อน้ำ 5 ส่วน กวนน้ำแล้วปล่อยให้ตกตะกอน ตักส่วนที่ลอยน้ำออก เพื่อแยก Fly ash ส่วนที่ลอยน้ำออกไป เทน้ำทิ้ง ทำซ้ำ 3 ครั้ง ก่อนที่จะนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ซีเมนต์ลอย ลอยน้ำ Cenospheres

นำไปล้างด้วยน้ำเปล่า แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง จากนั้นจึงนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.1.2 การกำจัดสารมลทิน

นำซีเมนต์ที่ล้างแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่สารมลทินออก

3.3.1.3 การคัดขนาดอนุภาค

นำซีเมนต์ไปคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาด โดยใช้ตะแกรงเบอร์ 60, 120, 400 ตามลำดับ โดยขนาดของความละเอียดของตะแกรงแต่ละเบอร์มีดังนี้

ตะแกรงเบอร์ 60	มีขนาดช่องว่าง 250 μm
ตะแกรงเบอร์ 120	มีขนาดช่องว่าง 125 μm
ตะแกรงเบอร์ 400	มีขนาดช่องว่าง 38 μm

3.3.2 การผลิต Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม

3.3.2.1 การผลิต Precursor

ผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับ TiH_2 ในปริมาณ 0.6 wt.% และขึ้นเถ้าในปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 wt.% โดยใช้เครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นแบ่งผงที่ผสมเข้ากันดีแล้วมา 10 กรัม นำไปอัดขึ้นรูปโดยใช้ผงลงในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (die) เคลือบด้วยแมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) เพื่อป้องกันชิ้นงานติดแม่พิมพ์ ใช้แรงดันในการอัดขึ้นงาน 650 MPa

3.3.2.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

นำ Precursor ที่ได้ใส่ลงในแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์ (Boron nitride) แล้วนำไปให้ความร้อนในเตาที่อุณหภูมิ 800°C โดยแต่ละส่วนผสมใช้เวลาในการให้ความร้อน 300, 315, 330, 345 และ 360 วินาทีตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

3.3.3 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และโฟมอะลูมิเนียม

การวัดความหนาแน่นของ Precursor ทำได้โดยชั่งน้ำหนักและใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ วัดขนาดเพื่อหาปริมาตรของ Precursor จากนั้นนำน้ำหนักและปริมาตรของ Precursor มาหาค่าความหนาแน่นได้ดังสมการ (3.1)

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

โดย

$$m_{\text{precursor}} = \text{น้ำหนักของ Precursor (g)}$$

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

การหาความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียม ทำให้โดยใช้วิธี Archimedes' densitometry ดังสมการ (3.2)

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

โดยที่ W_{air} = น้ำหนักของโฟมในอากาศ (g)

W_{water} = น้ำหนักของโฟมในน้ำ (g)

การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมสามารถหาได้จากสมการ (3.3)

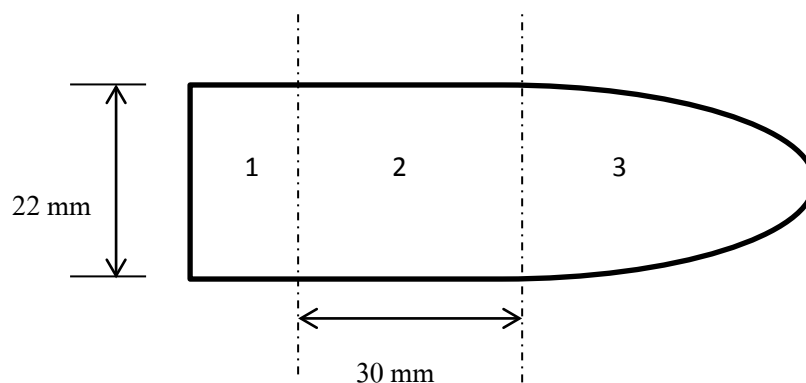
$$\% Expansion = \left[\frac{V_{foam} - V_{precursor}}{V_{precursor}} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ $V_{precursor}$ = ปริมาตรของ Precursor (cm³)

V_{foam} = ปริมาตรของโฟม (cm³)

3.3.4 การทดสอบการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีน

นำโพลีเอทิลีนที่ได้จากการทดลองไปตัดด้วยเครื่อง Precision cutting machine ในทิศทางดังรูปที่ 3.1 นำโพลีเอทิลีนที่ตัดแล้วในส่วนที่ 2 ไปทดสอบแรงอัดโดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 2 mm/min จนถึง 80 % ของความเครียด



รูปที่ 3.1 ทิศทางการตัดโพลีเอทิลีนสำหรับทดสอบการรับแรงอัด

เมื่อได้ผลการทดสอบการทดสอบแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีน ได้แก่

ค่าความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) เป็นช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น หาได้จากค่าความเค้นที่ตัดจุดระหว่างกราฟจากผลการทดสอบแรงอัดกับเส้นตรงขนานกราฟ โดยตัดแกน y ที่ 0.2 % ความเครียด

ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังสมการ (3.4)

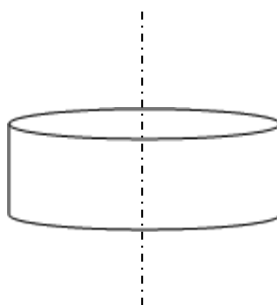
$$E = \int_0^{\epsilon_u} \sigma \cdot \epsilon \cdot d\epsilon \quad (3.4)$$

โดยที่ σ = ความเค้น (MPa)

ϵ = ความเครียด

3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Precursor และโพลีอะลูมิเนียม

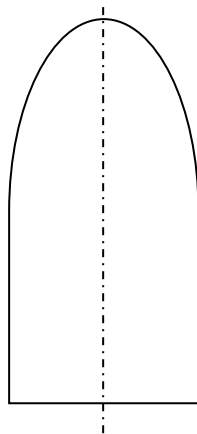
นำ Precursor ไปตัดด้วยเครื่อง Precision cutting machine ในทิศทางตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางดังรูปที่ 3.2 นำชิ้นส่วนที่ตัดได้ไปทำการขึ้นรูปตัวเรือนแบบเย็น (Cold mounting) จากนั้นนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปตัวเรือนแล้วไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120, 220, 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 2000 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6, 3 และ 1 μm ตามลำดับแล้วจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดแล้วไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ต่อไป



รูปที่ 3.2 ทิศทางการตัด Precursor

3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียม

สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคภายในของโพลีอะลูมิเนียม สามารถทำได้โดยการตัดโพลีอะลูมิเนียมในแนวตั้งฉากกับฐานของโพลีด้วยเครื่อง Precision cutting machine ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นนำชิ้นส่วนโพลีอะลูมิเนียมที่ตัดแล้วไปพ่นสเปรย์สีดำ เมื่อรอให้สีแห้งแล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้เกิดความคมชัดของโครงสร้าง สแกนโครงสร้างโพลีด้วยเครื่องสแกนรูปที่ความละเอียด 600 dpi



รูปที่ 3.3 ทิศทางการตัดโฟมอะลูมิเนียมสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การวิเคราะห์รูปด้วยโปรแกรม Image J 1.43u เป็นการวิเคราะห์ที่สามารถบอกค่าสมบัติต่างๆของโครงสร้างโฟมออกมาเป็นค่าเชิงปริมาณได้ เช่น ขนาดของโพรงอากาศ ค่าสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโฟมอะลูมิเนียม เป็นต้น

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

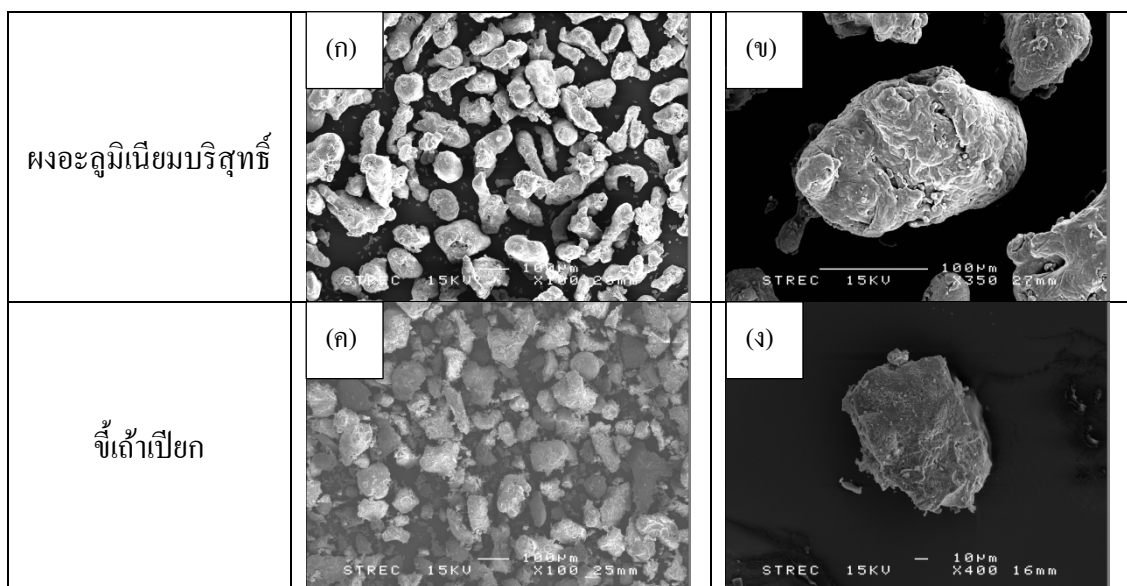
นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของปริมาณซีเมนต์และซีเมนต์เปียกในโฟมอะลูมิเนียมต่อพฤติกรรมการขยายตัวของและพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมวิเคราะห์และเปรียบเทียบ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมที่เพิ่มเสถียรภาพด้วยซีเมนต์ชนิดต่างๆที่ปริมาณแตกต่างกัน

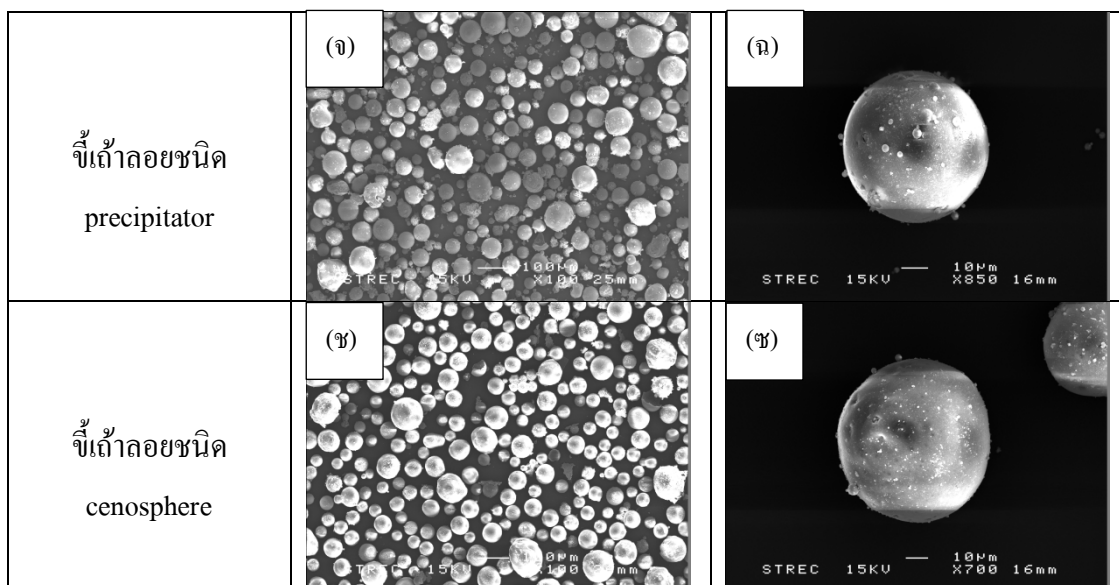
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาค

รูปที่ 4.1 แสดงรูปร่างลักษณะของผงวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ ได้แก่ ผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ อนุภาคซีเมนต์เปียก อนุภาคซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator และอนุภาคซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere จากรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าผงอะลูมิเนียมมีลักษณะรูปร่างของผงแบบเดนไดรต์ (Dendrite) ส่วนใหญ่ปรากฏเป็นแท่งยาว จากรูปที่ 4.1 (ค) และ (ง) จะเห็นได้ว่าซีเมนต์เปียกมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) โดยจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าและพบว่าไม่มีผิวขรุขระ จากรูปที่ 4.1 (จ) และ (ฉ) พบว่าซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator มีลักษณะเป็นทรงกลมตัน (Solid spherical) พื้นผิวค่อนข้างเรียบและมีผงอนุภาคขนาดเล็กเกาะติดอยู่ตามผิวของผงซีเมนต์บ้างเล็กน้อย จากรูปที่ 4.1 (ซ) และ (ฅ) พบว่าซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ลักษณะเป็นทรงกลมกลวง (Hollow spherical) พื้นผิวเรียบกว่าซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเกาะติดของอนุภาคขนาดเล็กบนพื้นผิวของผงซีเมนต์เช่นเดียวกับซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator





รูป 4.1 ภาพ SEM พงอนุภาค

4.2 การคัดขนาดอนุภาค

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณร้อยละโดยมวลของขี้เถ้าทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการคัดกรอง อนุภาคขี้เถ้าเป็ยกส่วนใหญ่จะมีขนาดตั้งแต่ 38 μm ขึ้นไปและขี้เถ้าเป็ยกส่วนใหญ่จะไม่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 400 สำหรับอนุภาคขี้เถ้าลอยทั้งชนิด Precipitator และ Cenosphere โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดตั้งแต่ 1-250 μm

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณขี้เถ้าในช่วงขนาดต่างๆ

ประเภทของขี้เถ้า	ปริมาณขี้เถ้าแยกตามขนาดของอนุภาค (wt.%)			
	>250 μm	125-250 μm	38-125 μm	< 38 μm
ขี้เถ้าเป็ยก	30	37	32	< 1
ขี้เถ้าลอยชนิด Precipitator	-	33	39	28
ขี้เถ้าลอยชนิด Cenosphere	-	36	34	30

4.3 การกระจายตัวของอนุภาคซีเฝ้า

ตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงการกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 60, 120 และ 400 พบว่า ในแต่ละช่วงขนาด ซีเฝ้าเปียกมีขนาดเฉลี่ย และการกระจายตัวสูงสุด รองลงมาคือซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere และ ซีเฝ้าลอยชนิด Precipitator ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซีเฝ้าเปียก

ช่วงขนาด	D ₁₀ μm	D ₅₀ μm	D ₉₀ μm	ขนาดเฉลี่ย μm
< 38 μm	2.12	21.84	46.87	23.76
38-125 μm	11.92	74.53	144.61	78.2
125-250 μm	117.6	188.25	268.5	186.95
>250 μm	260.5	426.06	719.51	457.85

ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซีเฝ้าลอยชนิด Precipitator

ช่วงขนาด	D ₁₀ μm	D ₅₀ μm	D ₉₀ μm	ขนาดเฉลี่ย μm
< 38 μm	0.8	9.95	28.56	12.69
38-125 μm	4.66	50.63	94.61	51.8
125-250 μm	113.02	172.68	239.92	171.16
>250 μm	201.61	301.00	406.52	295.83

ตารางที่ 4.4 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere

ช่วงขนาด	D ₁₀ μm	D ₅₀ μm	D ₉₀ μm	ขนาดเฉลี่ย μm
< 38 μm	0.75	9.81	35.38	14.44
38-125 μm	9.10	64.29	110.00	65.04
125-250 μm	88.10	165.66	235.67	161.47
>250 μm	-	-	-	-

4.4 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์

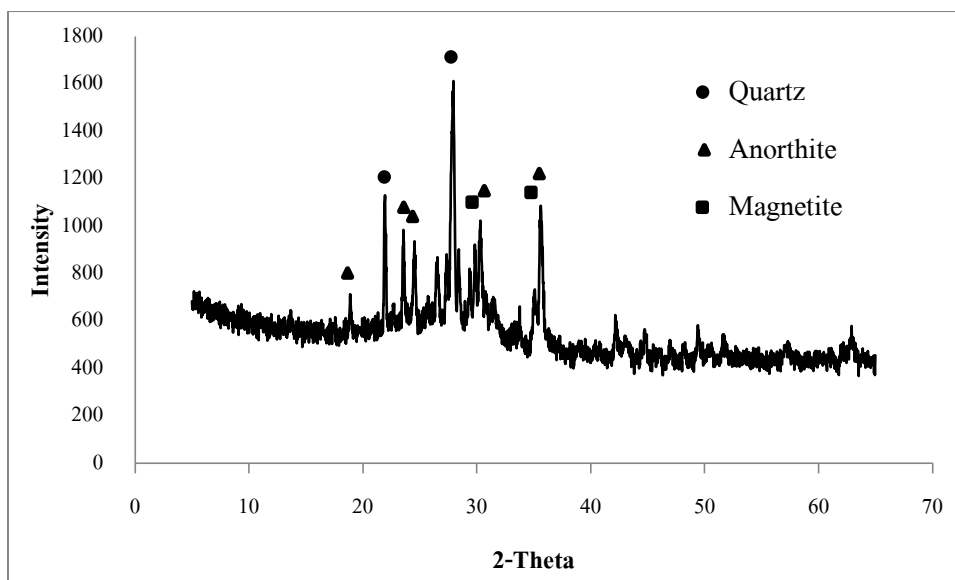
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบของซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิดมีส่วนประกอบหลักเป็นสารประกอบออกไซด์ได้แก่ SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ และ CaO และมีธาตุอื่นๆเจือปนเล็กน้อยได้แก่ Na₂O, MgO, P₂O₅, SO₃, K₂O, TiO₂, MnO₂, NiO, ZnO, SrO, ZrO₂, และ BaO

ตารางที่ 4.5 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์

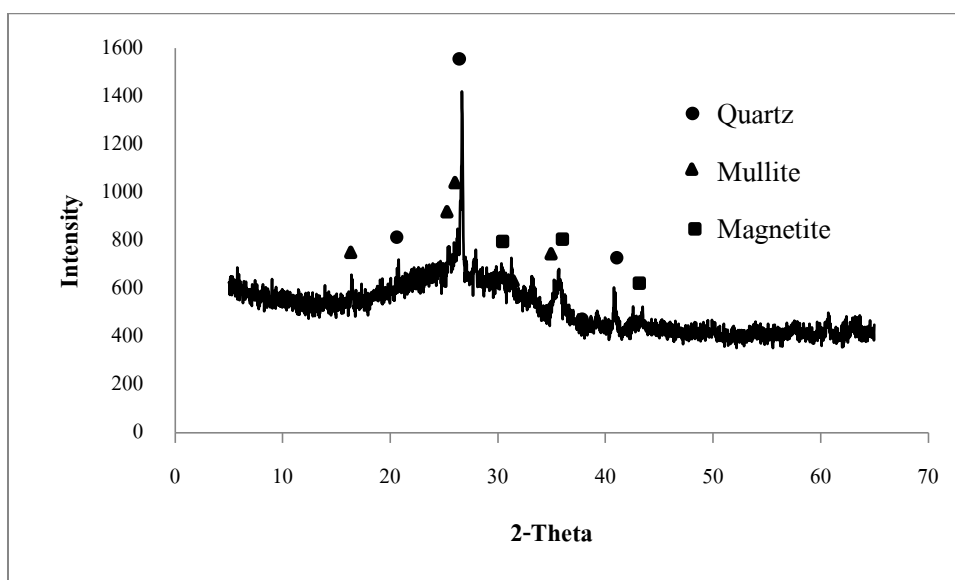
สารประกอบ	ซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator	ซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere	ซีเมนต์เป็ยก
Na ₂ O	2.44	0.995	0.55
MgO	3.09	1.024	1.241
Al ₂ O ₃	15.72	18.073	14.246
SiO ₂	33.68	39.078	33.048
P ₂ O ₅	0.28	0.174	0.349
SO ₃	3.14	1.875	2.394
K ₂ O	3.02	8.692	3.042
CaO	19.57	14.819	21.249
TiO ₂	0.52	0.735	0.723
MnO ₂	0.17	0.116	0.245
Fe ₂ O ₃	15.56	10.7	22.523

NiO	0.01	-	0.088
ZnO	0.01	0.061	0.03
SrO	0.05	0.019	0.079
ZrO ₂	0.02	0.014	0.031
BaO	0.15	0.148	0.163

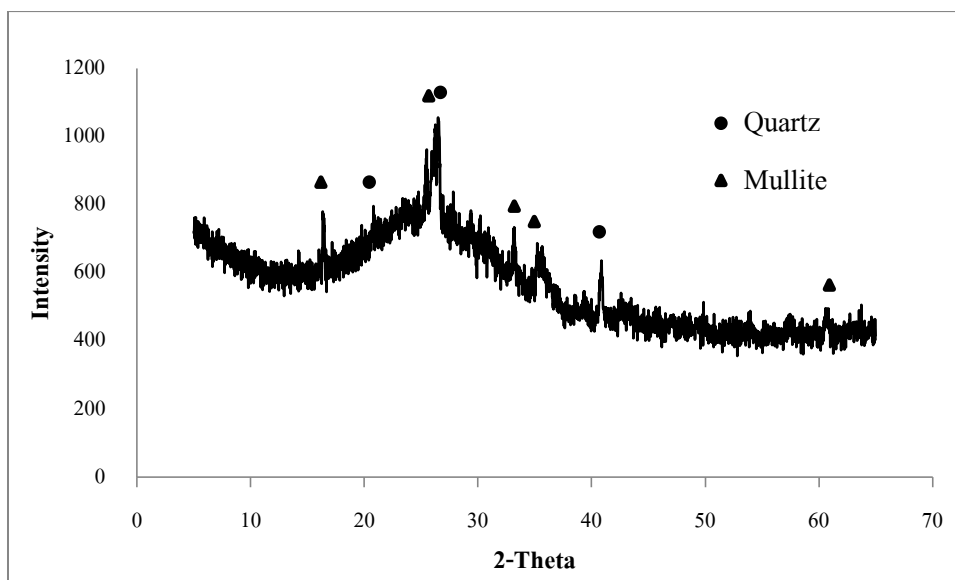
รูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของซีเมนต์เปียก ซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator และ ซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ตามลำดับ พิจารณาซีเมนต์เปียกแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างอัญฐาน โดยฐานของกราฟจะโค้งนูนขึ้นระหว่างช่วงมุม 2-Theta ตั้งแต่ 20 – 40 โดยประมาณ และยังพบโครงสร้างผลึกของ Quartz, Anorthite และ Magnetite ดังแสดงในรูปที่ 4.2 สำหรับซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างอัญฐาน โดยฐานของกราฟจะโค้งนูนขึ้นระหว่างช่วงมุม 2-Theta ตั้งแต่ 15 – 35 โดยประมาณ และพบโครงสร้างผลึกของ Quartz Mullite และ Magnetite ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สำหรับซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere แสดงให้เห็นโครงสร้างอัญฐาน โดยฐานของกราฟจะมีความโค้งนูนขึ้นระหว่างช่วงมุม 2-Theta ตั้งแต่ 15-40 โดยประมาณและพบโครงสร้างผลึกของ Quartz และ Mullite ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เปียก



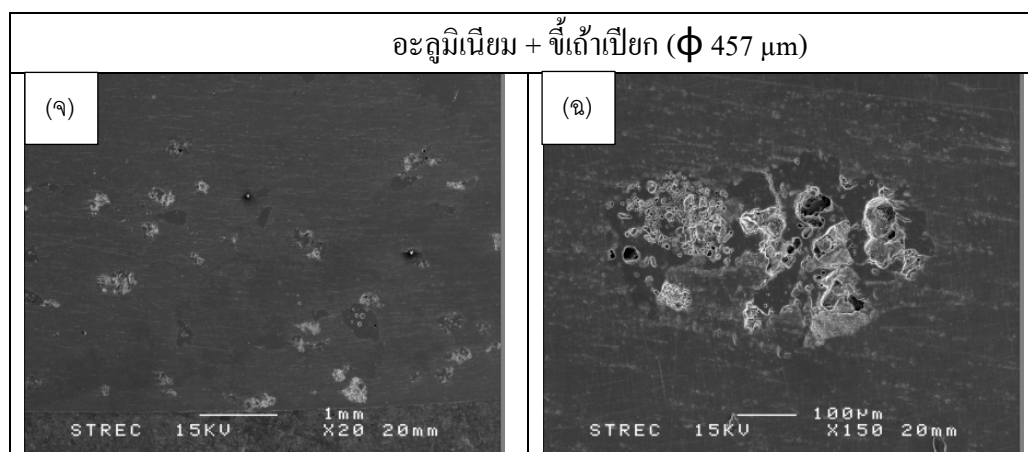
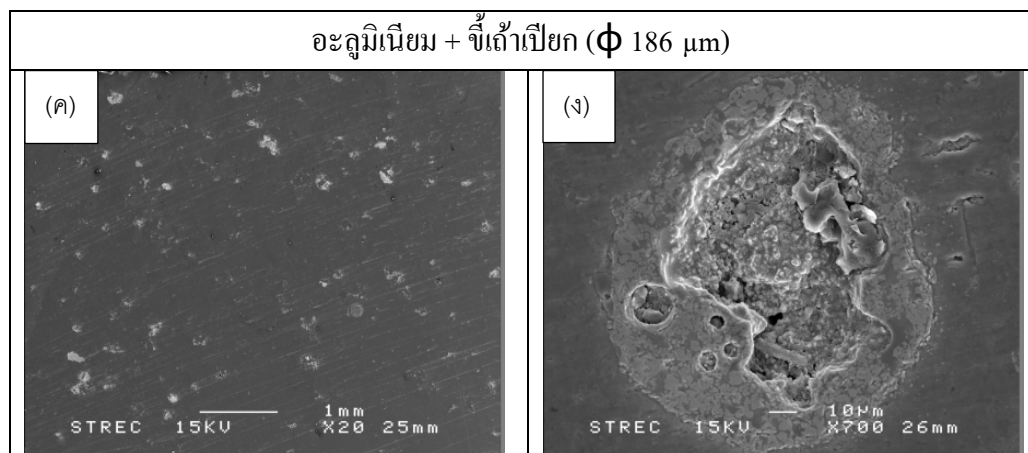
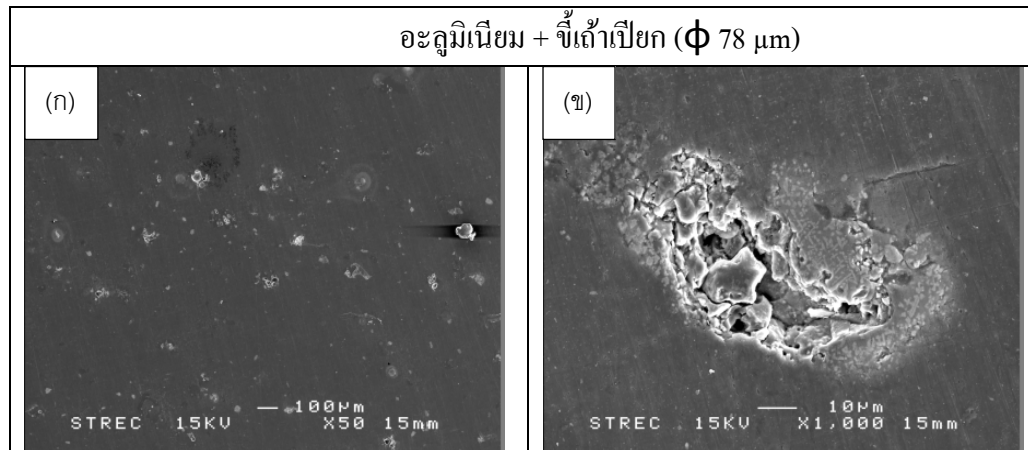
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere

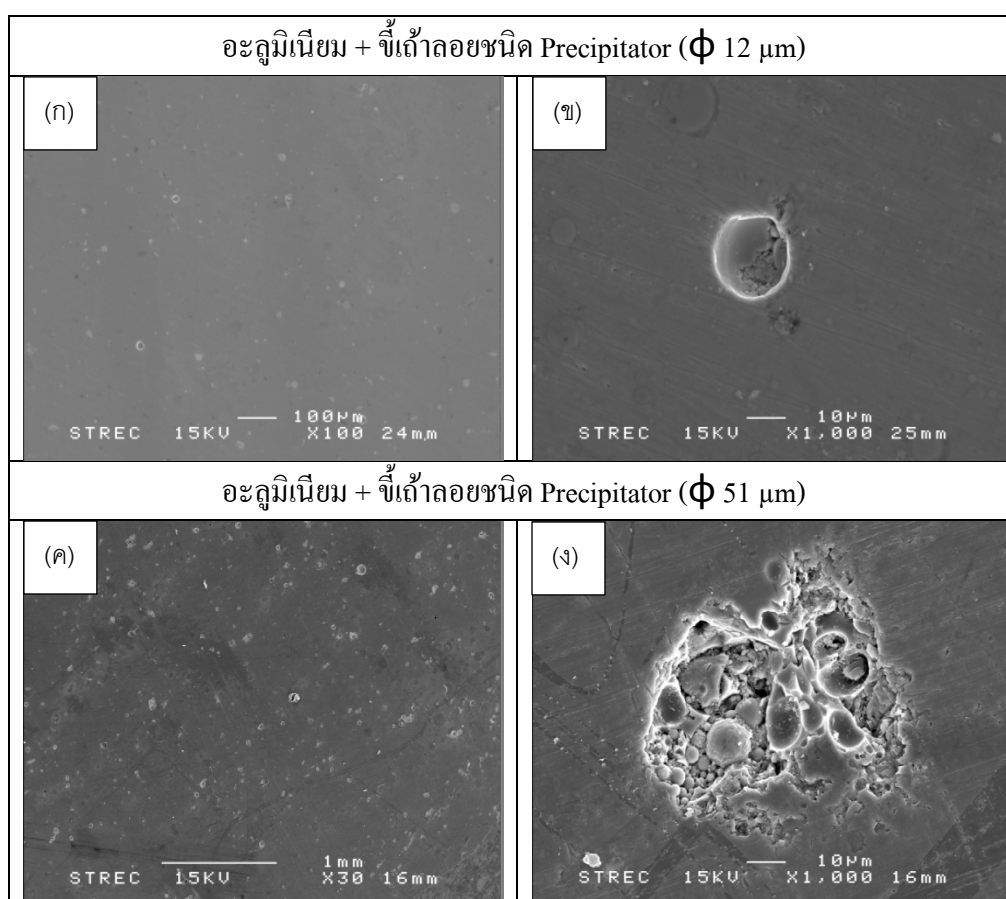
4.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Precursor หลังการอัดขึ้นรูป

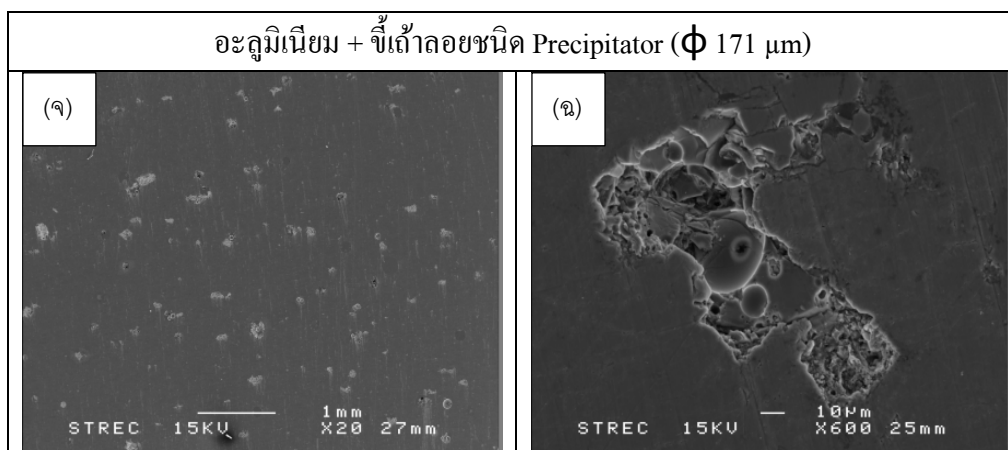
พิจารณาชิ้นงาน Precursor ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียก ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าอนุภาคขนาดเล็ก จะมีการกระจายตัวบนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมได้ดีกว่าซีเมนต์เปียกที่มีขนาดใหญ่ และยังพบเศษของอนุภาคซีเมนต์ที่เกิดจากการแตกหักของอนุภาคภายหลังการอัดขึ้นรูป เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงบริเวณอนุภาค อาจพบช่องว่างขนาดเล็ก (Void) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นและอนุภาคได้



รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของชิ้นงาน Precursor อะลูมิเนียมผสมจีไธ้าเปือก

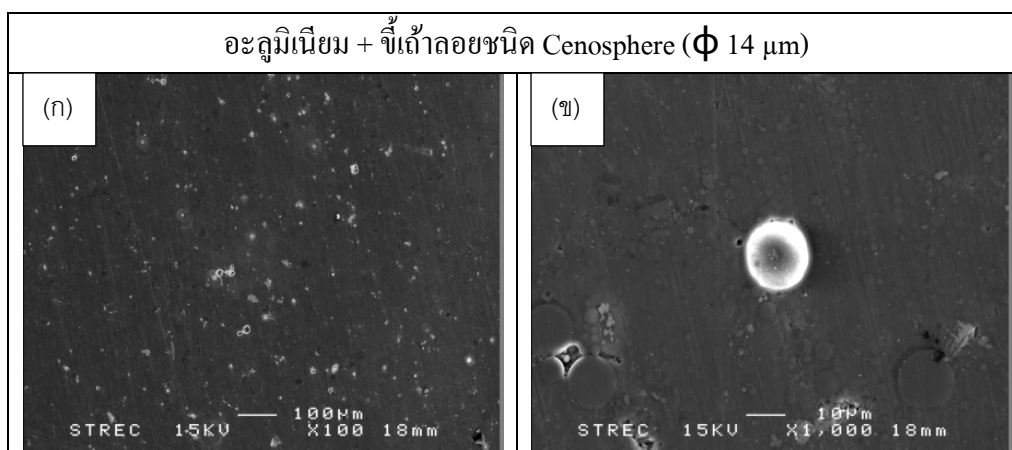
พิจารณาชิ้นงาน Precursor ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าอนุภาคนขนาดเล็ก จะมีการกระจายตัวบนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมได้ดีกว่าอนุภาคนขนาดใหญ่ และพบการแตกของอนุภาคซีเมนต์ซึ่งเกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยพบเห็นทั้งอนุภาคที่แตกละเอียด แตกบางส่วนและบางอนุภาคไม่เกิดการแตกหักเลย โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะทนต่อการแตกหักได้มากกว่าอนุภาคนขนาดใหญ่และอาจพบอนุภาคนขนาดเล็กรวมกันอยู่ภายในอนุภาคนขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.6 (ง)

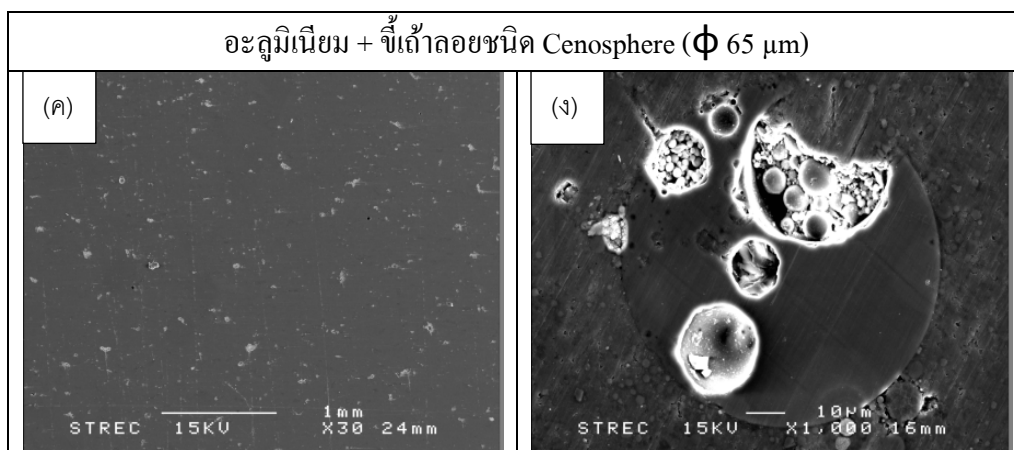




รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของชิ้นงาน Precursor อะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator

พิจารณาชิ้นงาน Precursor ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าอนุภาคซีเมนต์ส่วนใหญ่แตกละเอียดและกระจายตัวอยู่เต็มเนื้อพื้นอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตาม มีอนุภาคบางส่วนที่ไม่เกิดการแตกหักเช่นกัน ดังรูปที่ 4.7 (ข) และพบอนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันอยู่ภายในอนุภาคขนาดใหญ่เช่นเดียวกับซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ดังรูปที่ 4.7 (ง)



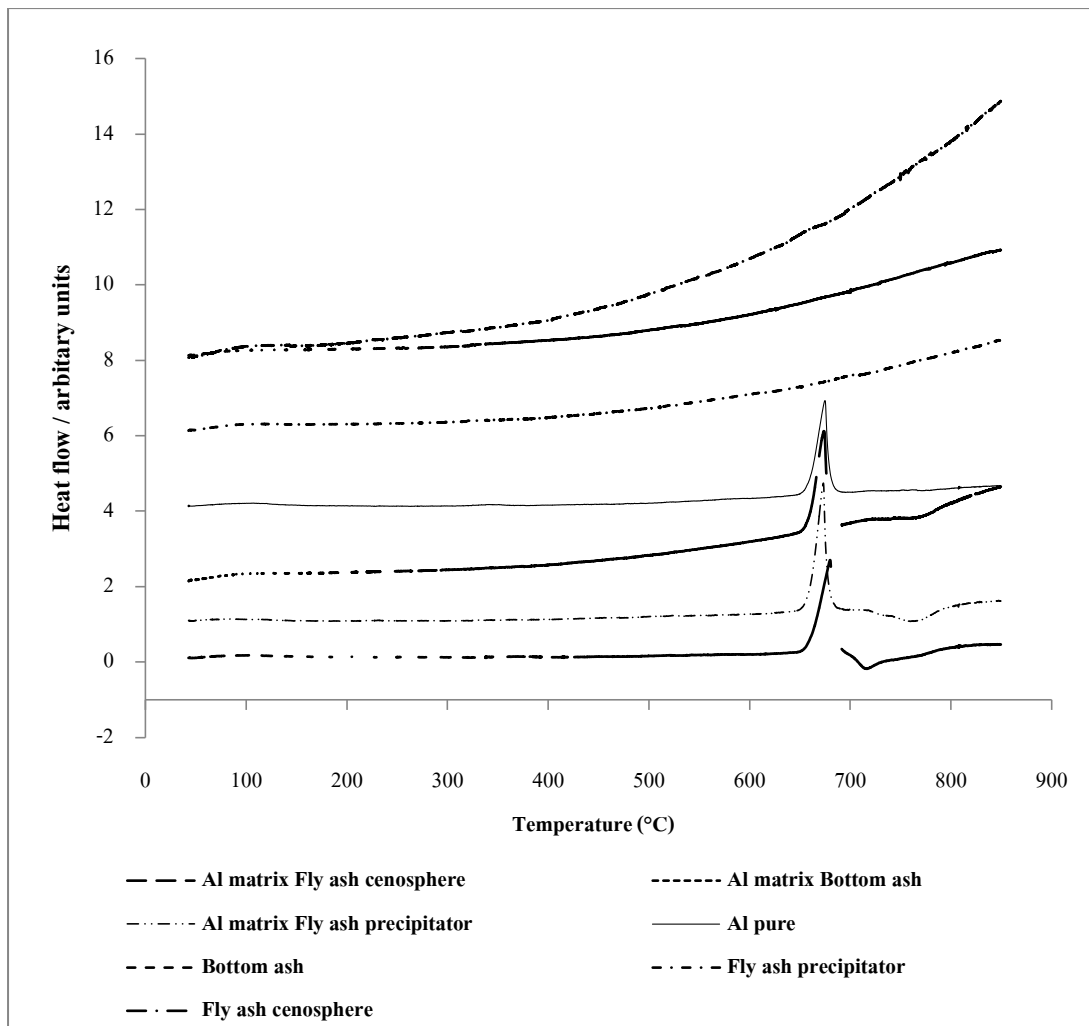


รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของชิ้นงาน Precursor อะลูมิเนียมผสมจี๊ด้าลอยชนิด Cenosphere

4.6 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน

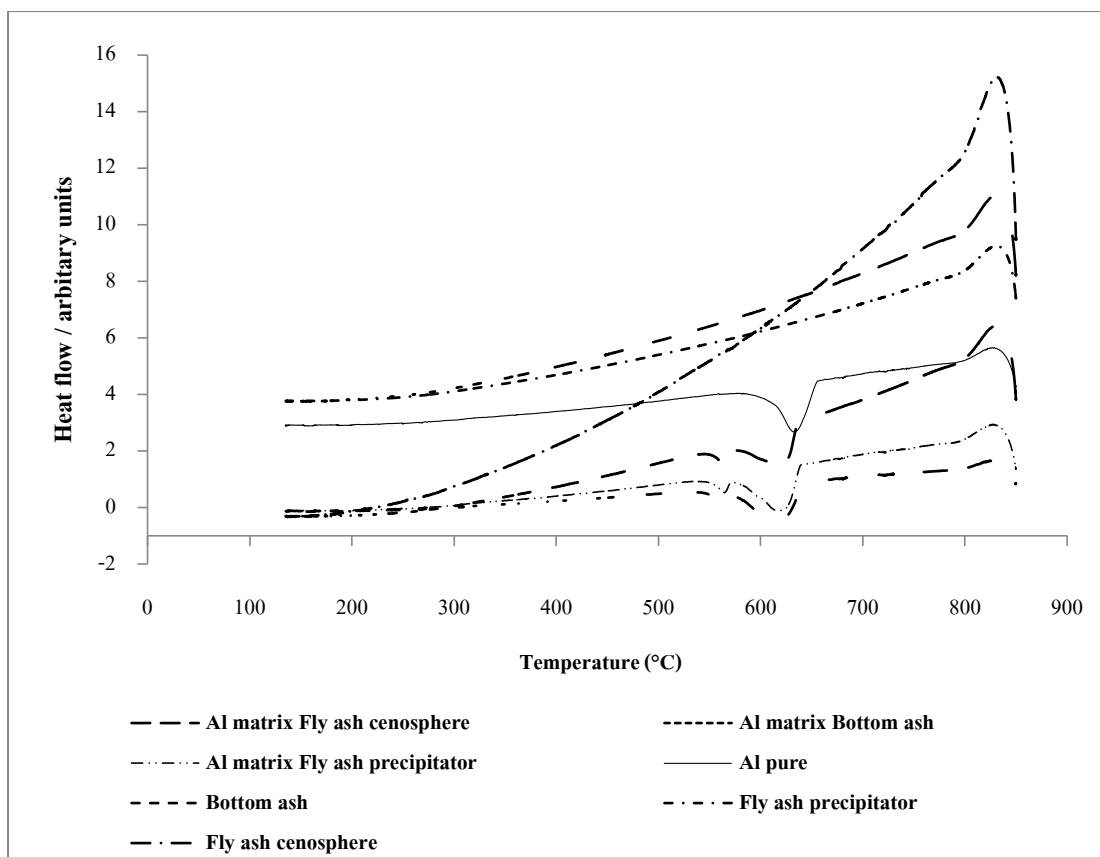
รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงกราฟ Differential scanning calorimetry (DSC) ของชิ้นงาน Precursor อะลูมิเนียมผสมจี๊ด้าเป็ยก อะลูมิเนียมผสมจี๊ด้าลอยชนิด Precipitator และอะลูมิเนียมผสมจี๊ด้าลอยชนิด Cenosphere ผงจี๊ด้าเป็ยก ผงจี๊ด้าลอยชนิด Precipitator และ ผงจี๊ด้าลอยชนิด Cenosphere ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 50 - 850°C ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที และที่อัตราการเย็นตัว 20°C/นาที

พิจารณารูปที่ 4.8 กราฟ DSC ขณะให้ความร้อนของชิ้นงานอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียมที่ 660°C พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมจี๊ด้าเป็ยก พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C เช่นกัน และพบปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 723°C พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมจี๊ด้าลอย Precipitator พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C และพบปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 717°C พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมจี๊ด้าลอยชนิด Cenosphere พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C และพบปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 700°C สำหรับกราฟ DSC ของจี๊ด้าทั้ง 3 ชนิด ไม่พบปฏิกิริยาใดๆในระหว่างการให้ความร้อน



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ทางความร้อน (DSC) ที่อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$

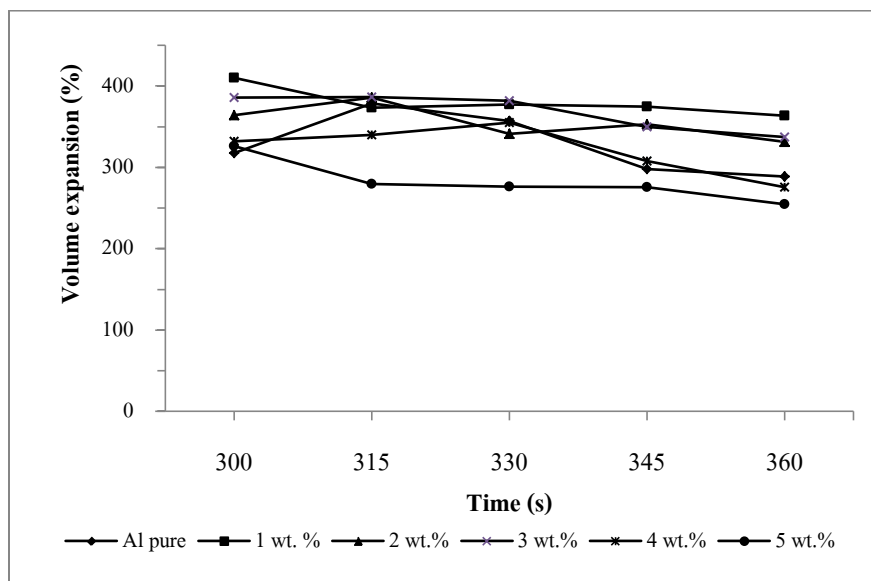
พิจารณารูปที่ 4.9 กราฟ DSC ขณะเย็นตัวของชิ้นงานอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบปฏิกิริยาการคายความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ 656°C ซึ่งเกิดจากการคายพลังงานระหว่างการแข็งตัวของอะลูมิเนียม พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมซีเฝ้าเปียก พบปฏิกิริยาคายพลังงาน 2 ช่วงที่อุณหภูมิประมาณ 635°C และ 573°C ตามลำดับ พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมซีเฝ้าลอย Precipitator พบปฏิกิริยาการคายความร้อน 2 ช่วงที่อุณหภูมิประมาณ 641°C และ 571°C ตามลำดับ พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere พบปฏิกิริยาการคายความร้อน 2 ช่วงที่อุณหภูมิประมาณ 642°C และ 574°C ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อนของอนุภาคซีเฝ้าทั้ง 3 ชนิด ไม่พบปฏิกิริยาใดๆระหว่างช่วงอุณหภูมิการเย็นตัว



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ทางความร้อน (DSC) ที่อัตราการขึ้นตัว $20^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$

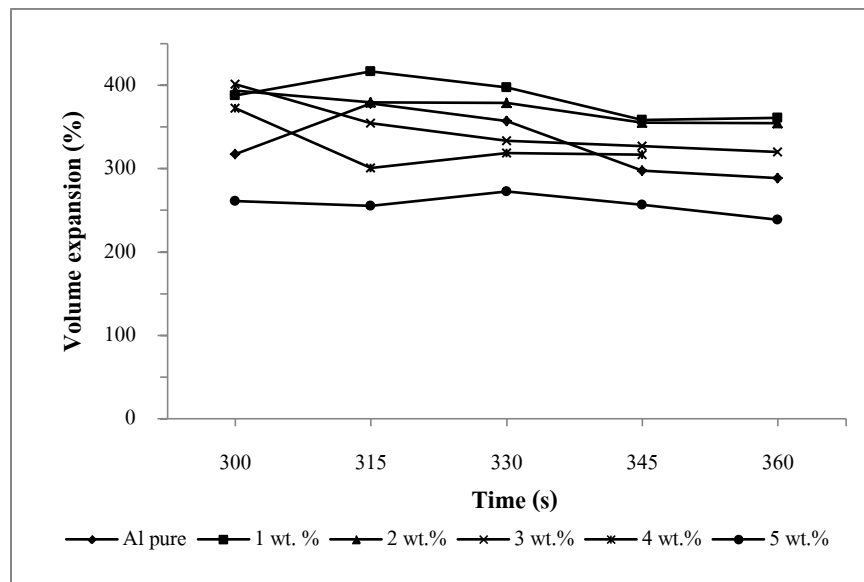
4.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เป็ยกขนาดเฉลี่ย 457 μm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน สำหรับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์พบว่า การขยายตัวสูงสุดเกิดขึ้นที่เวลา 315 วินาที มีการขยายตัว 378 % หลังจากนั้นการขยายตัวของโฟมจะลดลงตามลำดับ เนื่องจากเกิดการพังตัวของผนังโพรงอากาศ สำหรับโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์เป็ยกขนาดเฉลี่ย 457 μm พบว่า โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด 409 % การขยายตัวของโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ อย่างไรก็ตามการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ 1-3 wt.% ก็มีขนาดใกล้เคียงกันมาก



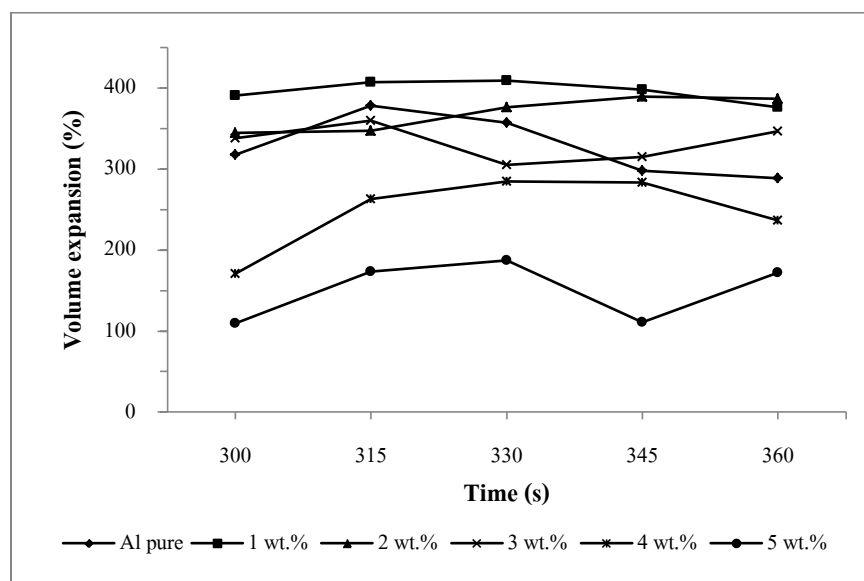
รูปที่ 4.10 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เป็ยกขนาดเฉลี่ย 457 μm

รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโพลีเอทิลีนที่ผสมซีเมนต์ที่เปลือกขนาดเฉลี่ย 186 μm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน พบว่าโพลีเอทิลีนที่ผสมซีเมนต์เปลือก 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด 416 % ที่เวลา 315 วินาทีและการขยายตัวของโพลีเอทิลีนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ การขยายตัวโดยรวมใกล้เคียงกับโพลีเอทิลีนที่ผสมซีเมนต์เปลือกขนาดเฉลี่ย 457 μm



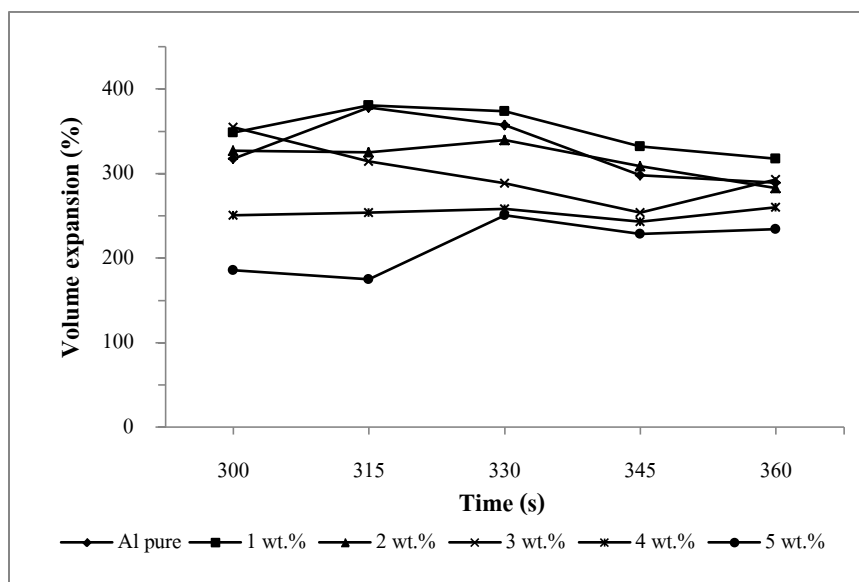
รูปที่ 4.11 การขยายตัวของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมซีเมนต์ที่เปลือกขนาดเฉลี่ย 186 μm

รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 78 μm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน พบว่าโฟมที่ผสมซีเมนต์เปียก 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดที่ 409 % ที่เวลา 330 วินาที และการขยายตัวของโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์เปียก การขยายตัวของโฟมที่ผสมซีเมนต์เปียก 1-3 wt.% มีค่าใกล้เคียงกับโฟมที่ผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 186 และ 457 μm แต่เมื่อเทียบกับที่ปริมาณซีเมนต์เปียก 4-5 wt.% พบว่าการขยายตัวของโฟมชนิดนี้ลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับโฟมทั้ง 2 ชนิดข้างต้น



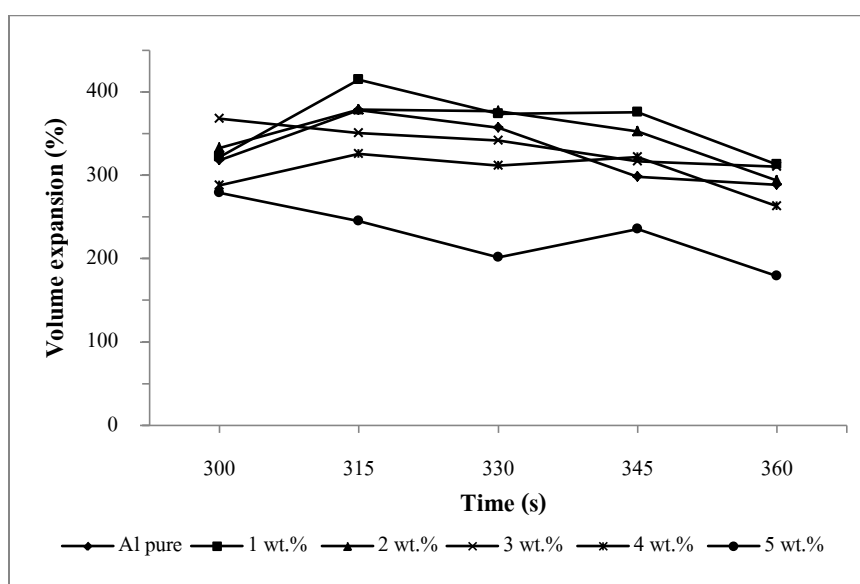
รูปที่ 4.12 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียกขนาดเฉลี่ย 78 μm

รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย $171 \mu\text{m}$ เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน พบว่าโฟมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดที่ 373 % ที่เวลา 330 วินาทีและการขยายตัวของโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์



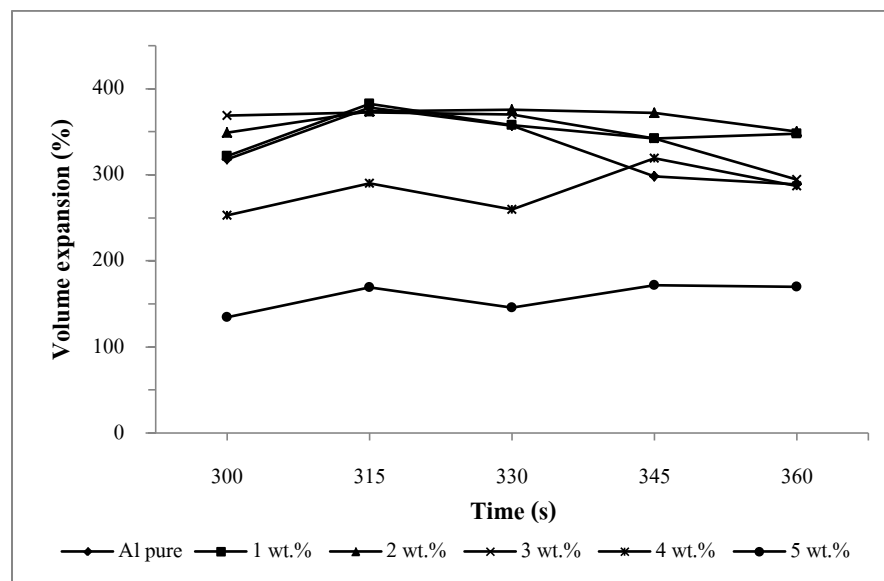
รูปที่ 4.13 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย $171 \mu\text{m}$

รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโพรมะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน พบว่าโพรมะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด 415 % ที่เวลา 315 วินาที และการขยายตัวของโพรมะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ การขยายตัวของโพรมะลูมิเนียมโดยทั่วไปมีค่าสูงกว่าโพรมะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm



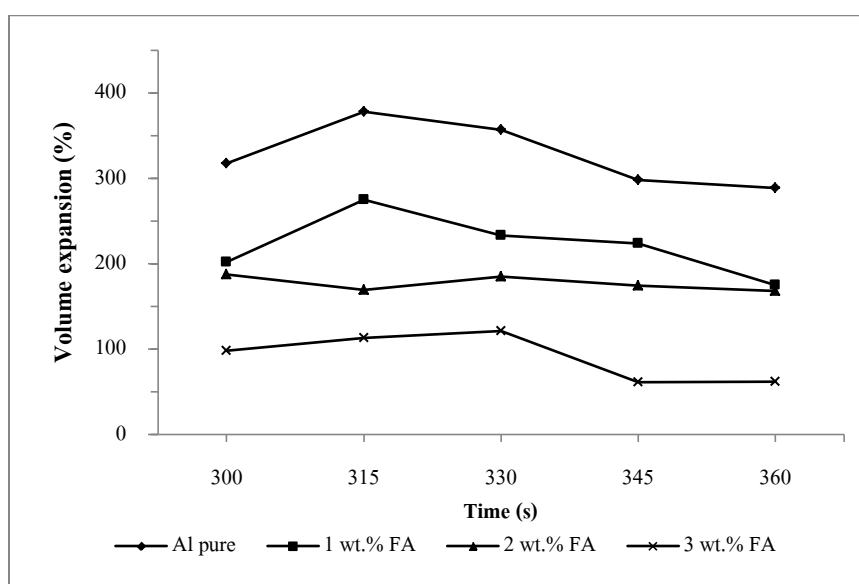
รูปที่ 4.14 การขยายตัวของโพรมะลูมิเนียมและโพรมะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm

รูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 12 μm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน พบว่าโพลีที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด 382 % ที่เวลา 315 วินาที และการขยายตัวของโพลีมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ โพลีที่ผสมซีเมนต์ 5 wt.% มีการขยายตัวต่ำมากเมื่อเทียบกับโพลีที่ผสมซีเมนต์ 2 ขนาดข้างต้น อย่างไรก็ตามการขยายตัวของโพลีโดยทั่วไปสูงกว่าโพลีที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm แต่น้อยกว่าโพลีที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm



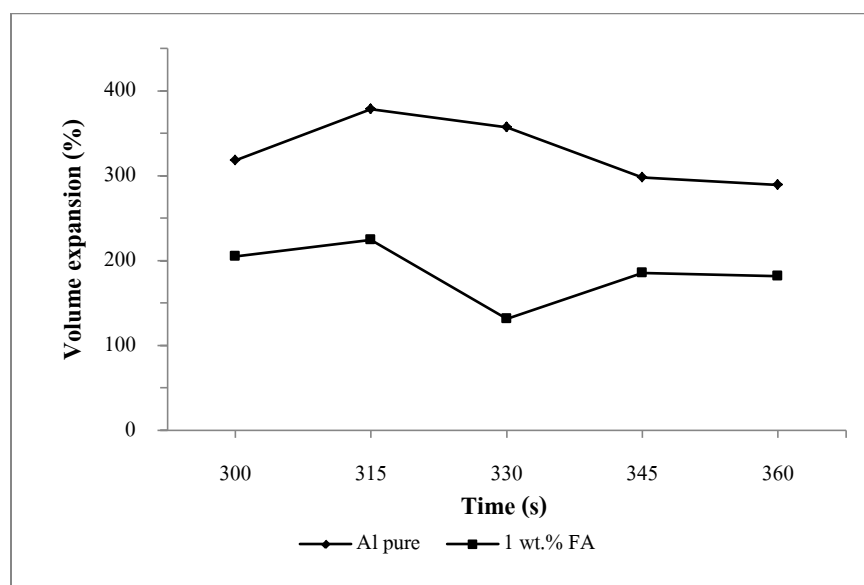
รูปที่ 4.15 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมและโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 12 μm

รูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 65 μm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน พบว่าโฟมที่ผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere ทุกส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมที่ผสมซีเฝ้า 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด 274 % ที่เวลา 315 วินาที การขยายตัวของโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเฝ้าเพิ่มขึ้นและไม่มีการขยายตัวของโฟมที่ผสมซีเฝ้าตั้งแต่ 4 wt.% ขึ้นไป



รูปที่ 4.16 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 65 μm

รูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm เทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน พบว่าโฟมที่ผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere ทุกส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมที่ผสมซีเฝ้า 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด 224 % ที่เวลา 315 วินาที และไม่มีการขยายตัวของโฟมที่ผสมซีเฝ้าตั้งแต่ 2 wt.% ขึ้นไป



รูปที่ 4.17 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm

4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียม

4.8.1 โพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

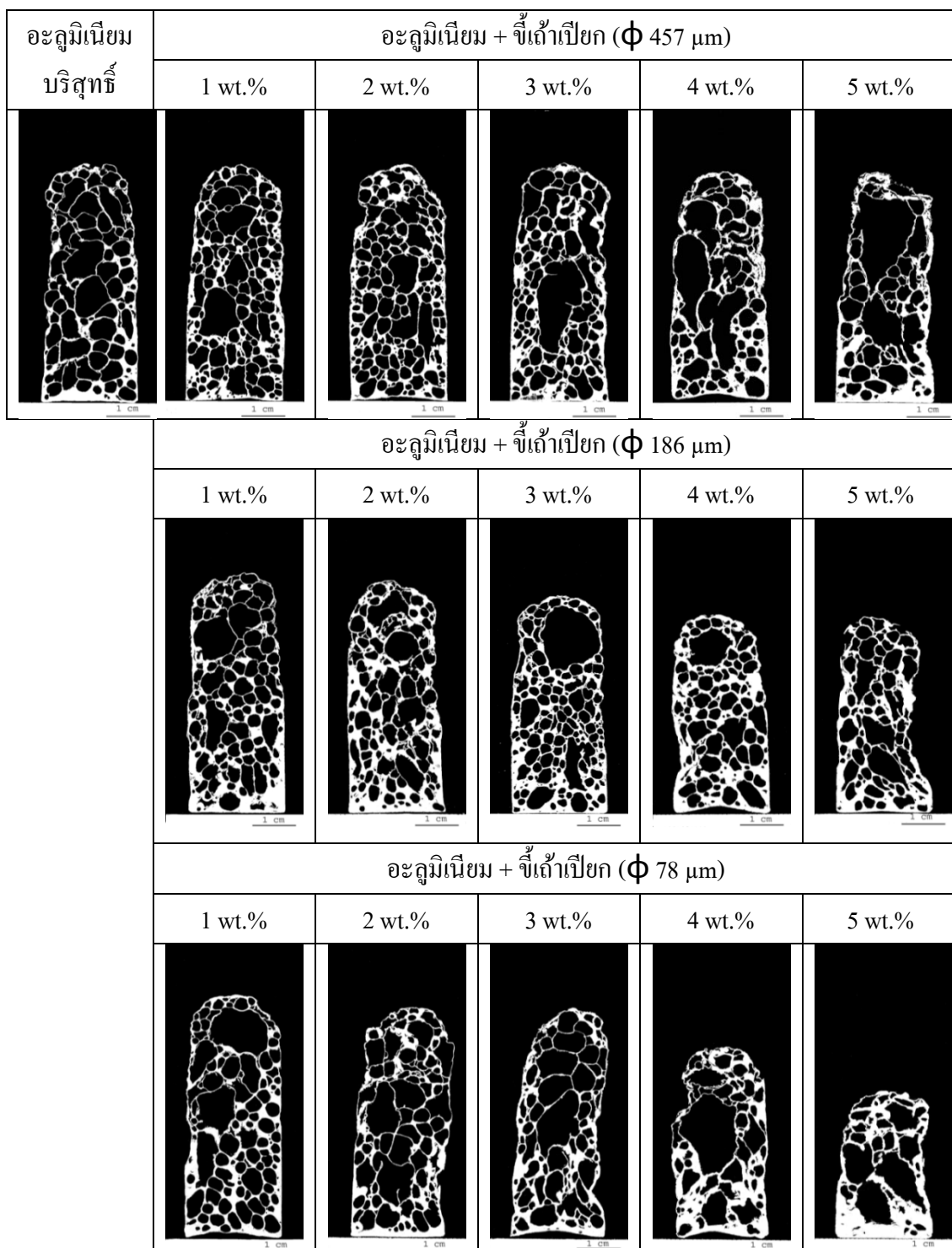
รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พิจารณาโครงสร้างโพรงอากาศของโพลี จะพบว่าโพรงอากาศมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวของโพรงอากาศไม่ดี โดยพบว่าตั้งแต่ช่วงกลางจนถึงช่วงบนของโพลีมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ถึงใหญ่มากจำนวนมาก ขณะที่โพรงอากาศขนาดเล็กกว่าจะอยู่บริเวณด้านล่างของโพลีและบริเวณขอบ จำนวนโพรงอากาศทั้งหมด 67 โพรง พื้นที่โพรงอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 0.115 cm^2

4.8.2 โพลีอะลูมิเนียมผสมซีดีเอเปียก

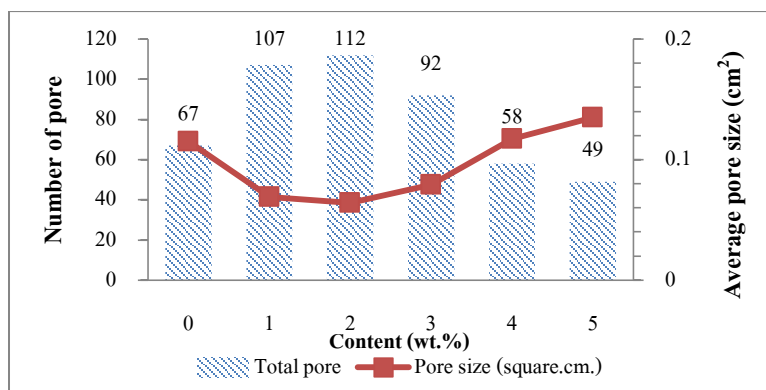
รูปที่ 4.18 - 4.21 แสดงรูปและผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคที่การขยายตัวสูงสุดของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพลีอะลูมิเนียมผสมซีดีเอเปียกขนาดเฉลี่ย 457, 186 และ 78 μm ตามลำดับ พิจารณาโครงสร้างโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมผสมซีดีเอเปียกที่ปริมาณ 1-3 wt.% ของทุกขนาดซีดีเอจะมีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยน้อยกว่าขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ รวมถึงจำนวนโพรงอากาศของโพลีก็มีปริมาณมากกว่าโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เช่นกัน ขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคลดลง ความสูงของโพลีมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อปริมาณซีดีเอในโพลีเพิ่มขึ้นและเมื่อขนาดของซีดีเอลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าขนาดของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีดีเอปริมาณ 1-2 wt.% จะมีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกันไม่ว่าซีดีเอจะมีขนาดเท่าใด โพลีที่ผสมซีดีเอปริมาณมาก มีแนวโน้มที่โครงสร้างของโพลีจะบิดเบี้ยวและมีโพรงอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ

พิจารณาโพลีอะลูมิเนียมผสมซีดีเอเปียกขนาดเฉลี่ย 457 μm พบว่า โพลีที่ผสมซีดีเอ 1 และ 2 wt.% มีโครงสร้างดีที่สุด โพรงอากาศมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน พบโพรงอากาศขนาดใหญ่เล็กน้อยบริเวณช่วงกลางของโพลี อย่างไรก็ตาม โพลีที่ผสมซีดีเอ 3 wt.% ขึ้นไปความสม่ำเสมอของโพรงอากาศกลับลดลงและพบโพรงอากาศขนาดใหญ่มากขึ้น โดยเฉพาะโพลีที่ผสมซีดีเอ 5 wt.% ซึ่งพบโพรงอากาศขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอหลายโพรง อีกทั้งรูปร่างของโพลีก็ยังบิดเบี้ยวอีกด้วย พิจารณาโพลีอะลูมิเนียมผสมซีดีเอเปียกขนาดเฉลี่ย 186 μm

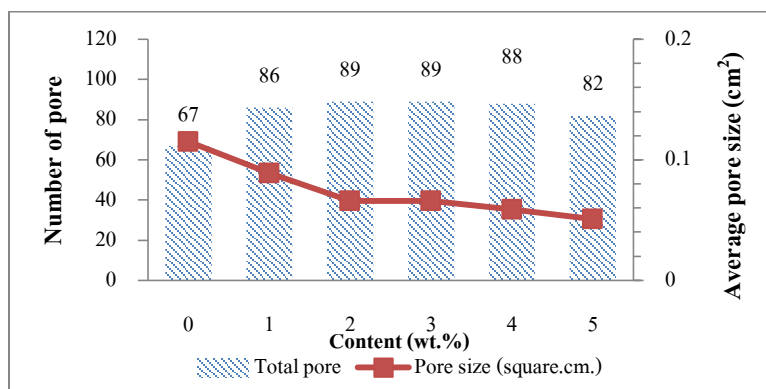
พบว่า โฟมที่ผสมซีเมนต์ปริมาณ 1 wt.% มีโครงสร้างดีที่สุดในขณะที่โพรงอากาศมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน พบโพรงอากาศขนาดใหญ่เล็กน้อยช่วงบนของโฟม สำหรับโฟมที่ผสมซีเมนต์ 5 wt.% ถึงแม้โพรงอากาศจะมีขนาดเล็กและขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกันแต่โฟมมีการขยายตัวต่ำและรูปร่างของโฟมบิดเบี้ยวอย่างมาก สำหรับโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เป็ยกขนาดเฉลี่ย 78 μm พบว่า โฟมที่ผสมซีเมนต์ปริมาณ 1 wt.% มีโครงสร้างดีที่สุดในขณะที่โพรงอากาศส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน พบโพรงอากาศขนาดใหญ่บ้างบริเวณช่วงกลางและช่วงบนของโฟม โฟมที่ผสมซีเมนต์ปริมาณ 2 wt.% ขึ้นไปพบว่ารูปร่างของโฟมมีความบิดเบี้ยวค่อนข้างมาก รวมถึงความสม่ำเสมอของโพรงอากาศก็ลดลง และปรากฏโพรงอากาศขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น



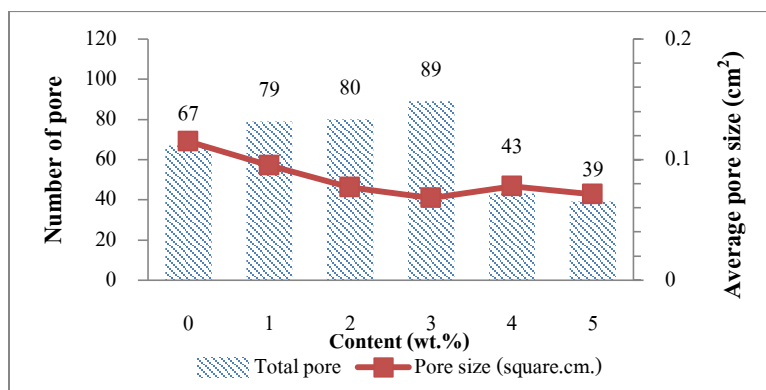
รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมจีไฉ่เป็ยก



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงจำนวน โพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เป็ยขนาดเฉลี่ย 457 μm



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงจำนวน โพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เป็ยขนาดเฉลี่ย 186 μm



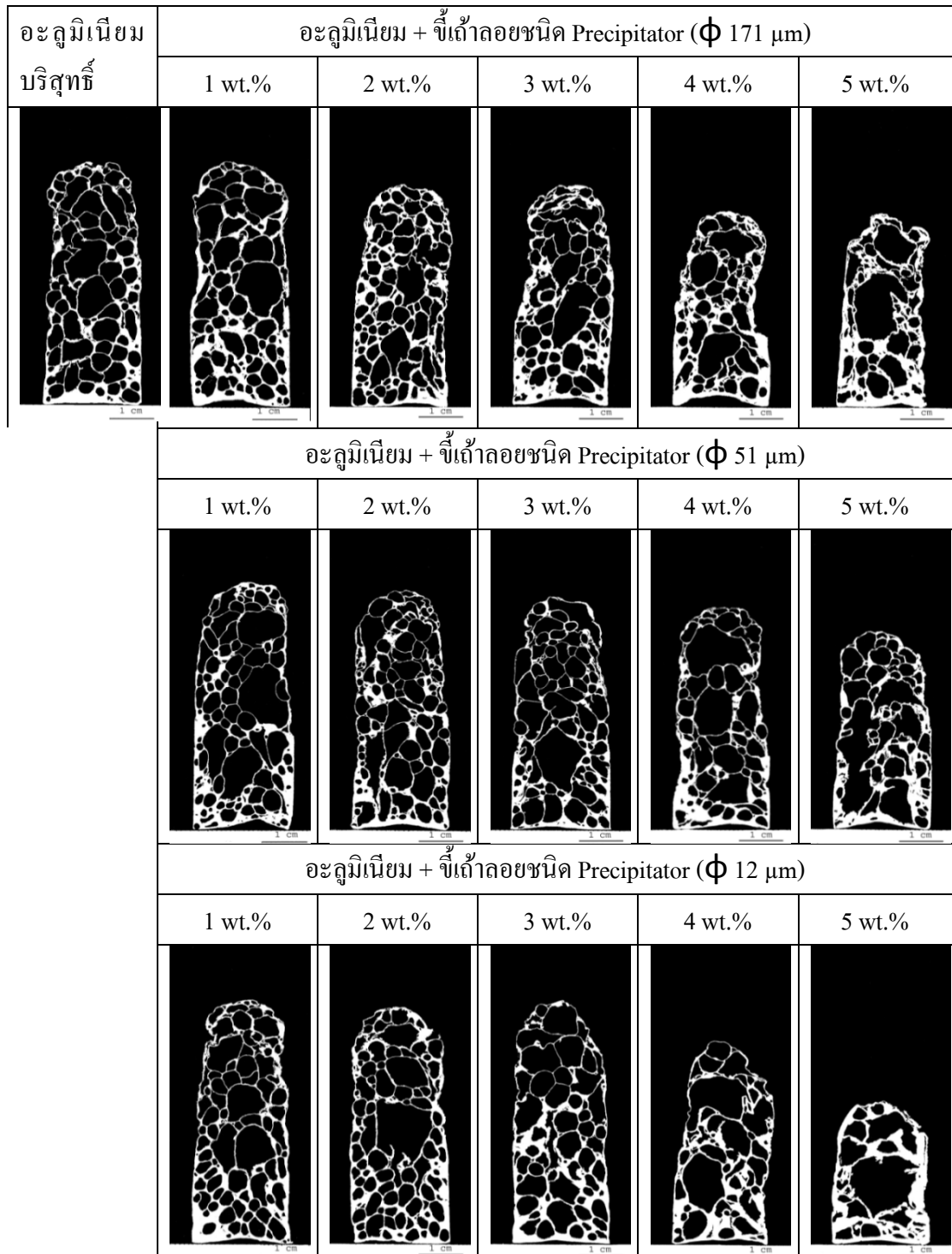
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงจำนวน โพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เป็ยขนาดเฉลี่ย 78 μm

4.8.3 โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอย Precipitator

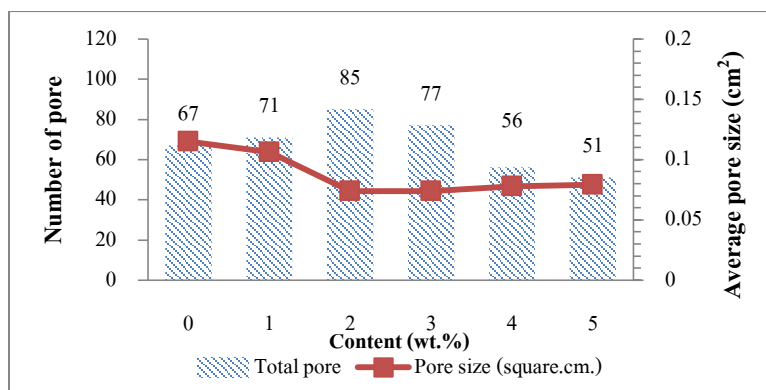
รูปที่ 4.22 - 4.25 แสดงรูปและผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคตามลำดับ ที่การขยายตัวสูงสุดของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 171, 51 และ 12 μm ตามลำดับ ขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ปริมาณ 1-3 wt.% ของทุกขนาดอนุภาค จะมีขนาดค่อนข้างเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ความสม่ำเสมอของขนาดโพรงอากาศจะลดลงเมื่อมีปริมาณซีเมนต์ 4 wt.% ขึ้นไป จำนวนโพรงอากาศของ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ปริมาณ 1-3 wt.% มีจำนวนมากกว่าโพรงอากาศของ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามจำนวนโพรงอากาศมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมซีเมนต์ 4 wt.% ขึ้นไป พิจารณาที่ขนาดอนุภาคเท่ากันจะพบว่าความสูงของ โฟมมีขนาดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ที่ส่วนผสม 1-3 wt.% ความสูงของ โฟมจะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่ส่วนผสมเท่ากัน พบว่าความสูงของ โฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ส่วนผสม 1-3 wt.% พบว่าความสูงของ โฟมมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ไม่ว่าอนุภาคจะมีขนาดเท่าใด

พิจารณาโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm พบว่า โฟมที่ผสมซีเมนต์ 1 และ 2 wt.% มีโพรงอากาศสม่ำเสมอที่สุด โพรงอากาศมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน โฟมที่ผสมซีเมนต์มากกว่า 2 wt.% ขึ้นไป รูปร่างของ โฟมจะค่อนข้างบิดเบี้ยว รวมถึงพบเห็นโพรงอากาศขนาดใหญ่จำนวนหนึ่งด้วย โดยเฉพาะใน โฟมที่ผสมซีเมนต์ 5

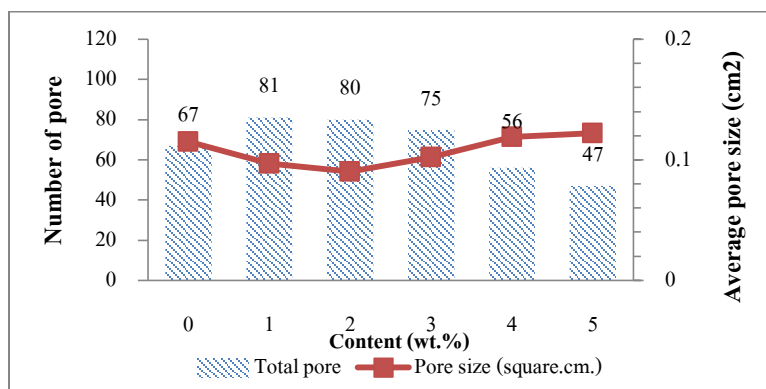
wt.% พิจารณาโฟมผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 51 μm พบว่า โฟมที่ผสมซีเมนต์ปริมาณ 1 wt.% และ 2 wt.% มีโครงสร้างดีที่สุดในที่โพรงอากาศมีขนาดเล็กสม่ำเสมอและมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ในโฟมที่ผสมซีเมนต์ 1 wt.% พบเห็นโพรงอากาศขนาดค่อนข้างใหญ่จำนวนหนึ่งกระจายตัวอยู่ในชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ขนาดของโพรงอากาศโดยทั่วไปส่วนใหญ่ยังคงมีขนาดเล็ก โฟมที่ผสมซีเมนต์ตั้งแต่ 3 wt.% ขึ้นไป พบว่าความสูงของโฟมจะลดลงตามลำดับ อีกทั้งยังเกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่และรูปร่างไม่สม่ำเสมอ กระจายตัวอยู่ในชิ้นงาน โดยเฉพาะโฟมที่ผสมซีเมนต์ 5 wt.% สำหรับโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 12 μm พบว่า โฟมที่ผสมซีเมนต์ปริมาณ 1 wt.% มีโครงสร้างดีที่สุดในที่โพรงอากาศส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน พบโพรงอากาศขนาดค่อนข้างใหญ่บ้างบริเวณกลางชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตาม ขนาดของโพรงอากาศโดยทั่วไปส่วนใหญ่ยังคงมีขนาดเล็ก โฟมที่ผสมซีเมนต์ตั้งแต่ 2 wt.% ขึ้นไป พบว่าจะเกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่มากขึ้นตามลำดับ อีกทั้งความสูงของโฟมก็ยังลดลงตามลำดับอีกด้วย โดยเฉพาะโฟมที่ผสมซีเมนต์ปริมาณ 5 wt.% จะพบว่าความสูงของโฟมลดลงอย่างมาก อีกทั้งภายในชิ้นงานยังประกอบไปด้วยโพรงอากาศที่ใหญ่และไม่สม่ำเสมอ



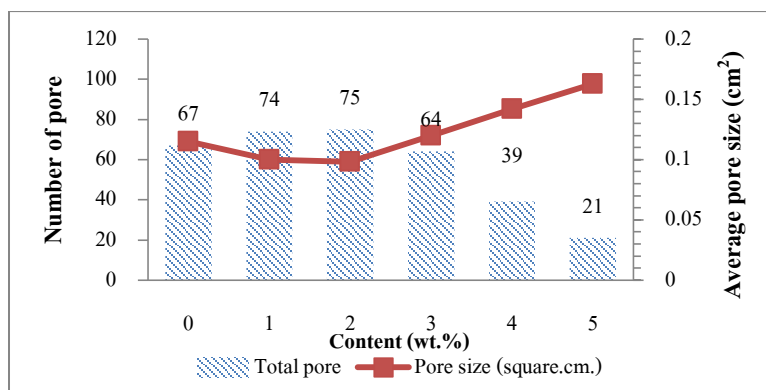
รูปที่ 4.22 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมจี๊ถั่วลยชนิด Precipitator



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงจำนวน โพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโพลีอะครีโลไนไรมและโพลีอะครีโลไนไรมผสมซีเมนต์ลอย precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm



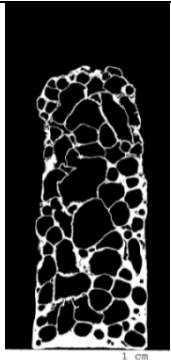




รูปที่ 4.24 กราฟแสดงจำนวน โพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโพลีอะครีโลไนไรมและโพลีอะครีโลไนไรมผสมซีเมนต์ลอย precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm



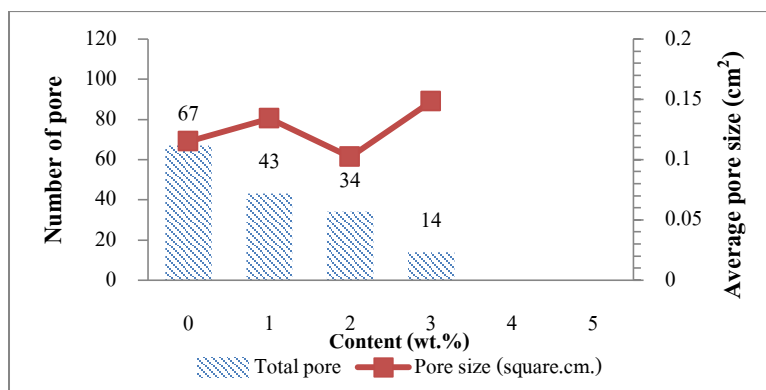
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงจำนวน โพรงอากาศและขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะครีไนด์และ โฟมอะครีไนด์ผสมซีเถ้าลอย precipitator ขนาดเฉลี่ย 12 μm

4.8.4 โฟมอะครีไนด์ผสมซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere

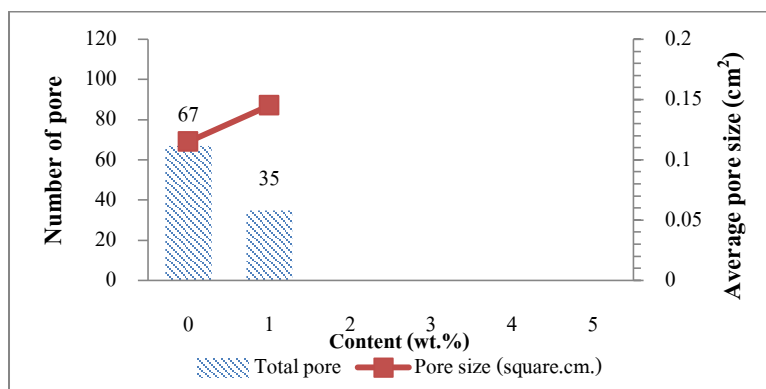
รูปที่ 4.26 - 4.28 แสดงรูปและผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคที่การขยายตัวสูงสุดของ โฟมอะครีไนด์และ โฟมอะครีไนด์ผสมซีเถ้าลอย Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 65 และ 14 μm ตามลำดับ พิจารณาโฟมที่ผสมซีเถ้าขนาด 65 μm พบว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าปริมาณ 1 wt.% มีโครงสร้างดีที่สุดใน แต่ก็ยังด้อยกว่าโครงสร้างของโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์ จำนวนโพรงอากาศของ โฟมผสมซีเถ้ามีจำนวนน้อยกว่าโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์และจำนวนโพรงอากาศมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้า รวมถึงขนาดเฉลี่ยของโพรงอากาศก็มีขนาดใหญ่กว่าของโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์ พิจารณาลักษณะโครงสร้างจากรูป 4.25 พบว่าโฟมที่ผสมซีเถ้ามีความสูงน้อยกว่าโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์อย่างชัดเจนและความสูงมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้า รวมถึงโพรงอากาศก็มีขนาดใหญ่และรูปร่างไม่สม่ำเสมอ พิจารณาโฟมที่ผสมซีเถ้าขนาด 14 μm โฟมที่ผสมซีเถ้าปริมาณ 1 wt.% มีโครงสร้างดีที่สุดใน แต่ก็ยังด้อยกว่าโครงสร้างของโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์ จำนวนโพรงอากาศของ โฟมผสมซีเถ้ามีจำนวนน้อยกว่าโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์ รวมถึงขนาดเฉลี่ยของโพรงอากาศก็มีขนาดใหญ่กว่าของโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้าง พบว่าโฟมมีความสูงน้อยกว่าโฟมอะครีไนด์บริสุทธิ์อย่างชัดเจน อีกทั้งโพรงอากาศยังมีขนาดใหญ่และรูปร่างไม่สม่ำเสมอ

อะลูมิเนียม บริสุทธิ์	อะลูมิเนียม + จี๊ดัลลอยชนิด Cenosphere (ϕ 65 μ m)		
	1 wt. %	2 wt. %	3 wt. %
			
	อะลูมิเนียม + จี๊ดัลลอยชนิด Cenosphere (ϕ 14 μ m)		
	1 wt. %	-	-
			

รูปที่ 4.26 โครงสร้างมหภาคของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมจี๊ดัลลอย Cenosphere



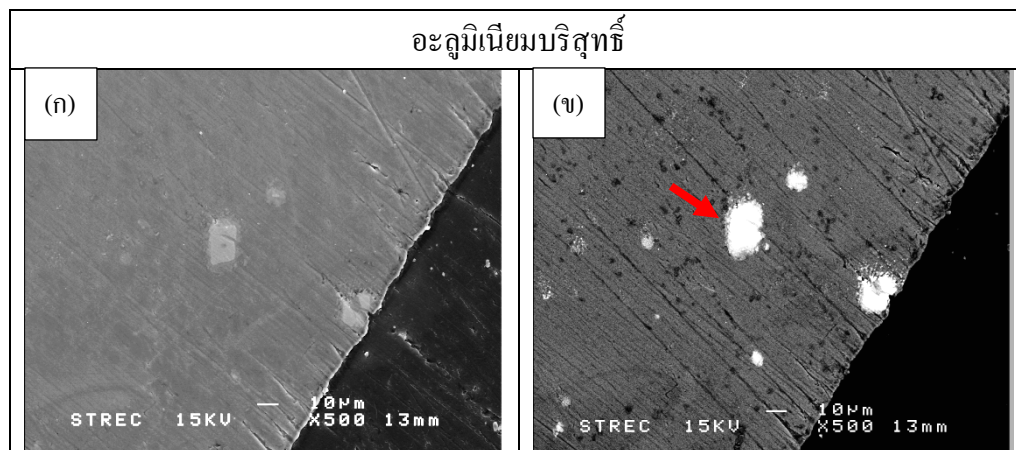
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงจำนวน โฟรงอากาศและขนาด โฟรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 65 μm



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงจำนวน โฟรงอากาศและขนาด โฟรงอากาศเฉลี่ยของ โฟมอะลูมิเนียมและ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm

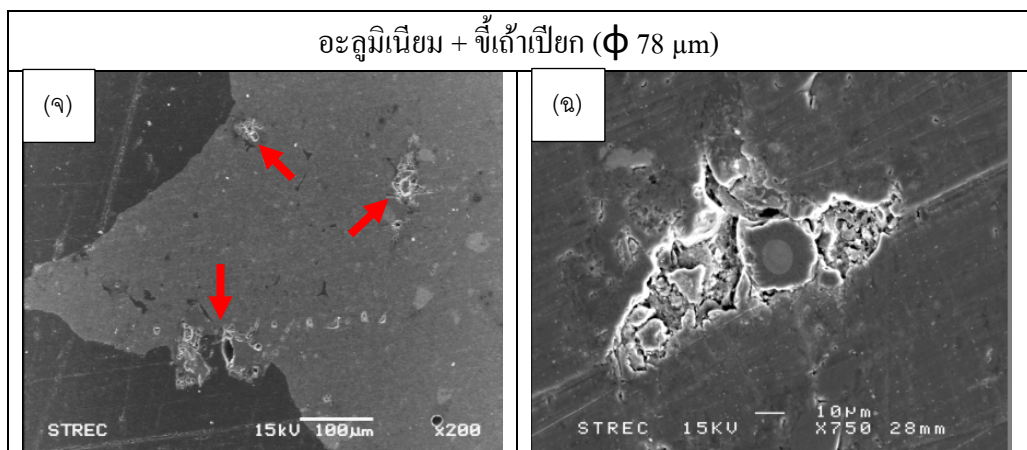
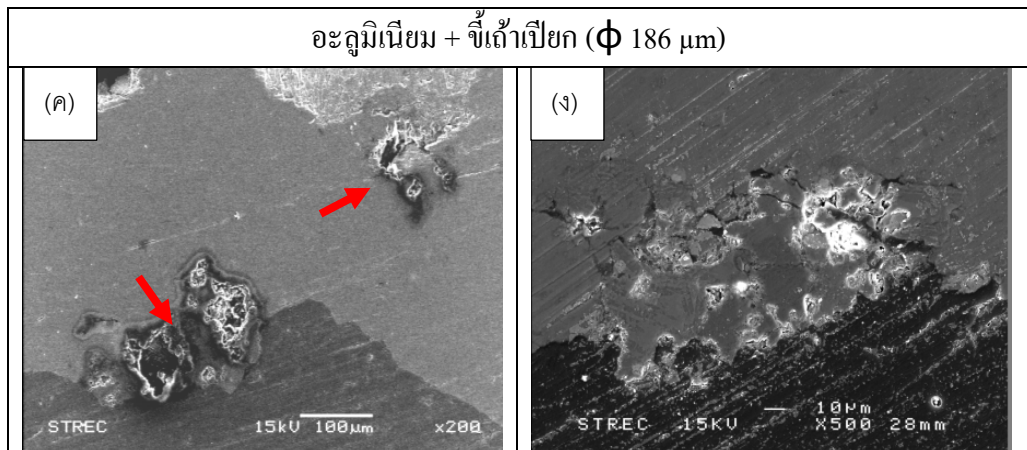
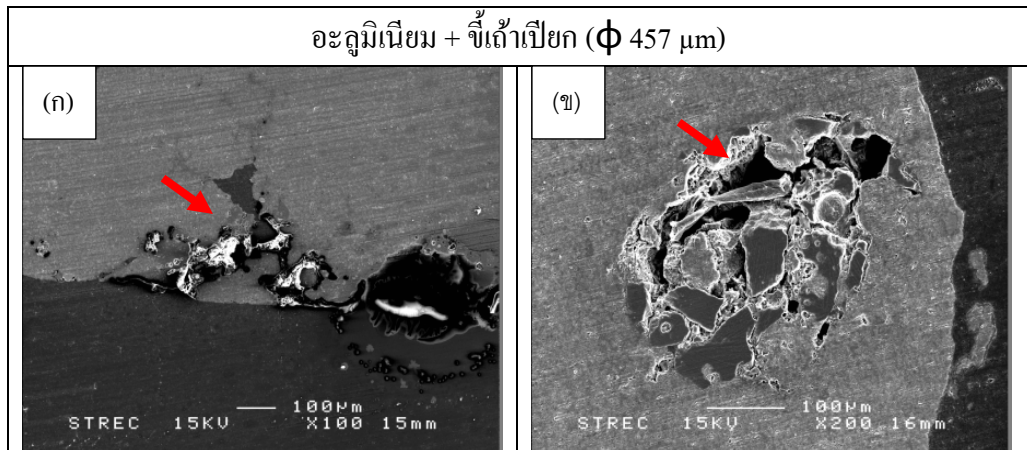
4.9 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโพลีอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่าย SEM ของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่าเนื้อพื้นมีลักษณะเรียบ ไม่มีสิ่งเจือปน และเมื่อวิเคราะห์พื้นผิวด้วย โหมด Back scattering ก็พบว่ามีอนุภาคของ TiH_2 ที่สลายตัวไม่หมด ฝังอยู่ภายในเนื้อชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.28 (ข)



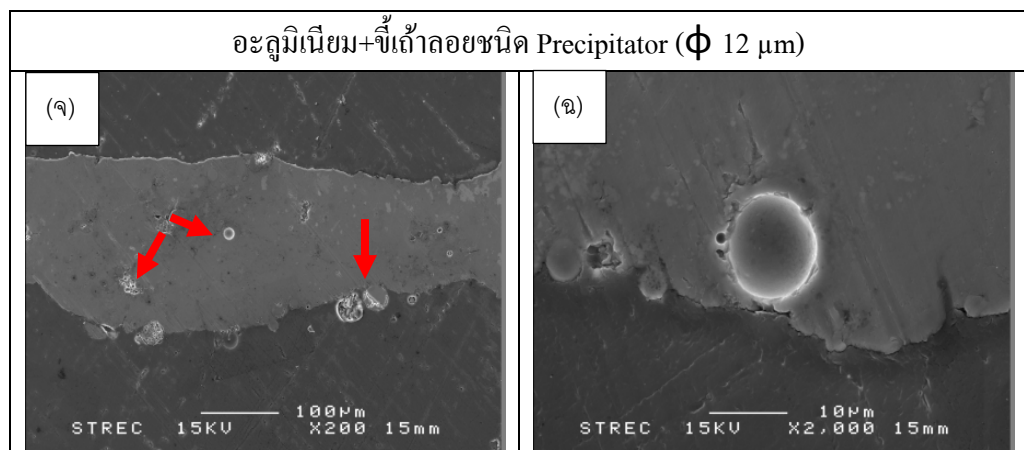
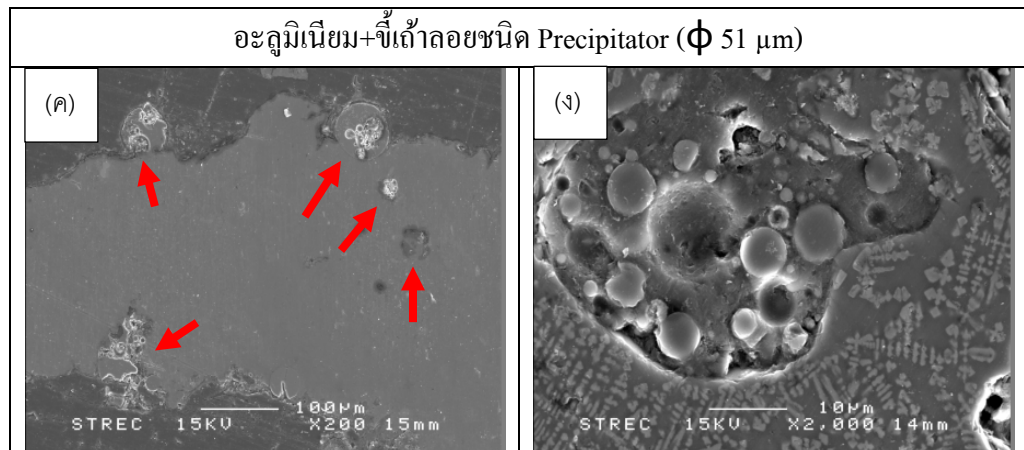
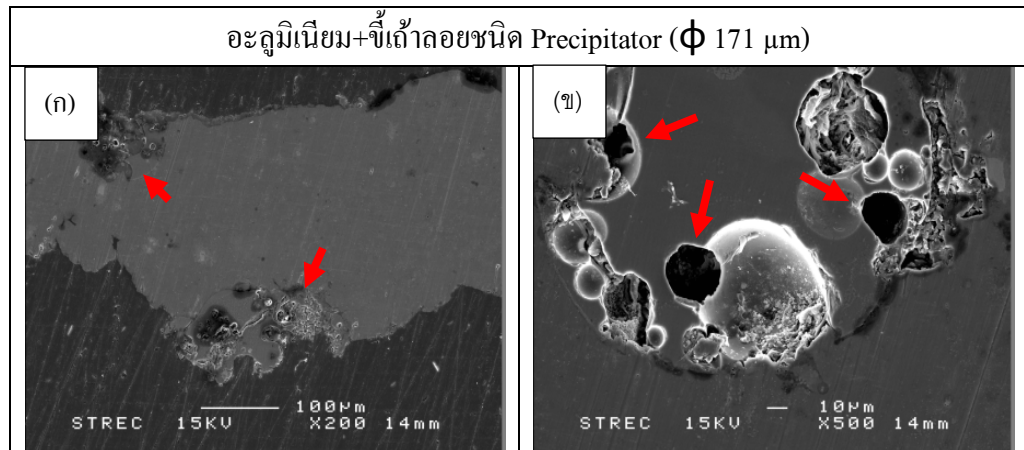
รูปที่ 4.29 ภาพ SEM ของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่าย SEM ของโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียก พบว่าอนุภาคซีเมนต์ส่วนใหญ่มีแนวโน้มจะฝังตัวอยู่ตามขอบของก้านโครงอากาศ และมีบางส่วนเกาะอยู่กลางก้านโครงอากาศหรือบริเวณ Plateur border โดยโพลีที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 457 และ 186 μm อนุภาคซีเมนต์จะฝังตัวอยู่ที่บริเวณขอบขอบก้านโครงอากาศเกือบทั้งหมด ดังรูปที่ 4.30 (ก) และ 4.30 (ค) ในขณะที่โพลีผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 78 μm อนุภาคส่วนใหญ่จะฝังตัวอยู่ตามขอบก้านโครงอากาศเช่นกัน แต่ก็ยังมีอนุภาคบางส่วนที่ฝังตัวอยู่ใจกลางก้านโครงอากาศ ดังรูปที่ 4.30 (จ) สำหรับอนุภาคซีเมนต์ที่เกิดการแตกหักระหว่างการอัดขึ้นรูปมีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันและอาจพบช่องว่าง (Void) บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเนื้อพื้นและอนุภาคดังรูปที่ 4.30 (ข)



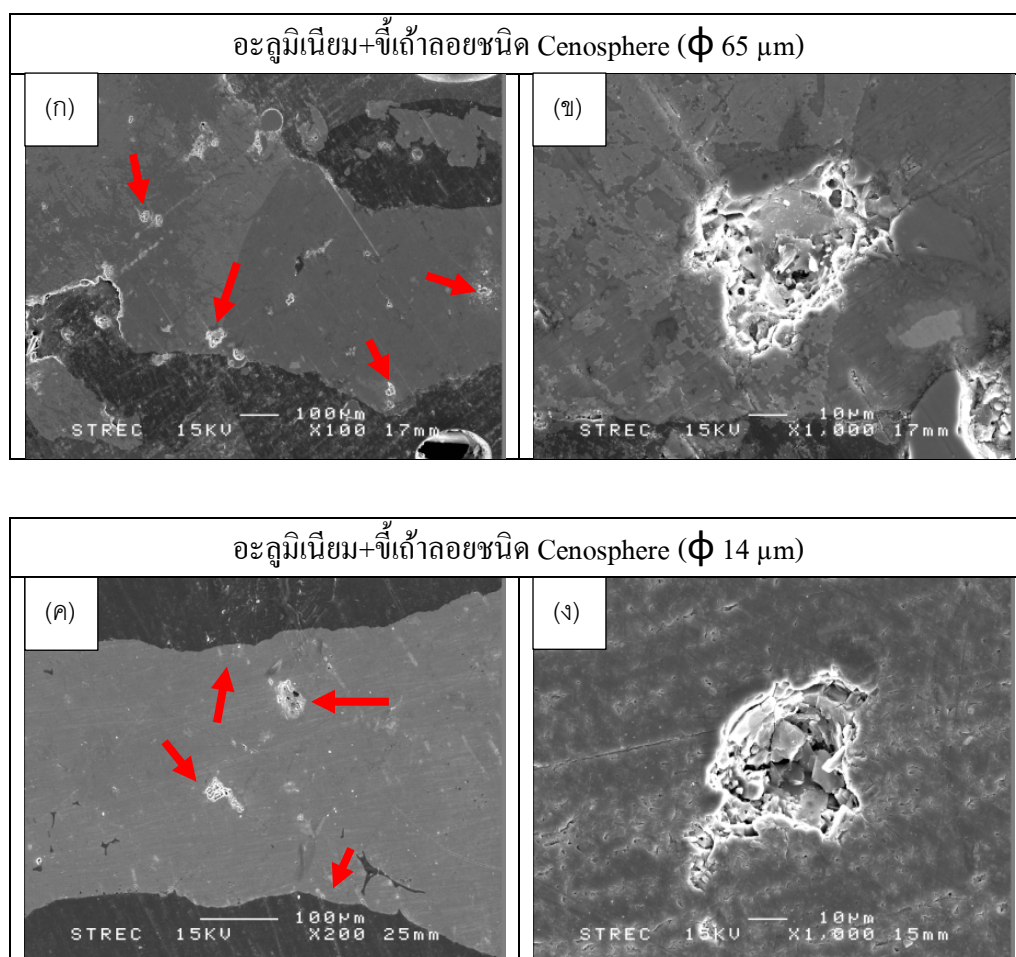
รูปที่ 4.30 ภาพ SEM ของโพลีอะลูมิเนียมผสมจีไธ้าเปือก

รูปที่ 4.31 แสดงภาพถ่าย SEM ของโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator พบว่าอนุภาคซีเมนต์ส่วนใหญ่มีแนวโน้มเกาะอยู่ตามขอบของก้านโพรงอากาศ และมีบางส่วนเกาะอยู่ตรงกลางก้านโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border โดยโพลีที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 171 μm อนุภาคจะฝังตัวอยู่ที่บริเวณขอบก้านโพรงอากาศเกือบทั้งหมด ดังรูปที่ 4.31 (ก) และพบการแตกหักของซีเมนต์เป็นจำนวนมาก รวมถึงพบช่องว่าง (Void) บริเวณเนื้อพื้นที่สัมผัสกับซีเมนต์เป็นจำนวนมาก ในขณะที่โพลีผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 51 และ 12 μm จะมีอนุภาคบางส่วนที่ฝังตัวอยู่ที่ใจกลางก้านโพรงอากาศ ดังรูปที่ 4.31 (ค) และ 4.31 (จ) และอนุภาคซีเมนต์มีแนวโน้มที่จะทนต่อการแตกหักมากกว่าซีเมนต์ขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.31 (ง) และ 4.31 (ฉ) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.31 (ง) พบว่าบริเวณเนื้อพื้นรอบๆซีเมนต์เกิดโครงสร้างเดนไดร์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และเนื้อพื้นอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.31 ภาพ SEM ของฟอมอะลูมิเนียมผสมซีดีถ้ำลอยชนิด Precipitator

รูปที่ 4.32 แสดงภาพถ่าย SEM ของโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอสชนิด Cenosphere พบว่าอนุภาคซีเมนต์มีการกระจายตัวเต็มเนื้อพื้นมากกว่าซีเมนต์เปียกและซีเมนต์ลอสชนิด Precipitator โดยพบเห็นอนุภาคซีเมนต์ทั้งบริเวณขอบก้านโพรงอากาศและบริเวณใจกลางก้านโพรงอากาศ พิจารณารูปที่ 4.32 (ก) และ 4.32 (ข) โพลีผสมซีเมนต์ลอสชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 65 μm อนุภาคซีเมนต์ซึ่งส่วนใหญ่แตกหักระหว่างการอัดขึ้นรูปจนเป็นเศษชิ้นเล็กชิ้นน้อย กระจายตัวอยู่ทั้งบริเวณขอบก้านโพรงอากาศและบริเวณใจกลางก้านโพรงอากาศ และพบช่องว่าง (Void) บริเวณเนื้อพื้นที่สัมผัสกับซีเมนต์ พิจารณารูปที่ 4.32 (ค) และ 4.32 (ง) โพลีผสมซีเมนต์ลอสชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm พบเศษจากแตกหักของอนุภาคซีเมนต์จำนวนมาก กระจายตัวอยู่ตามขอบก้านโพรงอากาศและใจกลางก้านโพรงอากาศเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.32 ภาพ SEM ของโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอสชนิด Cenosphere

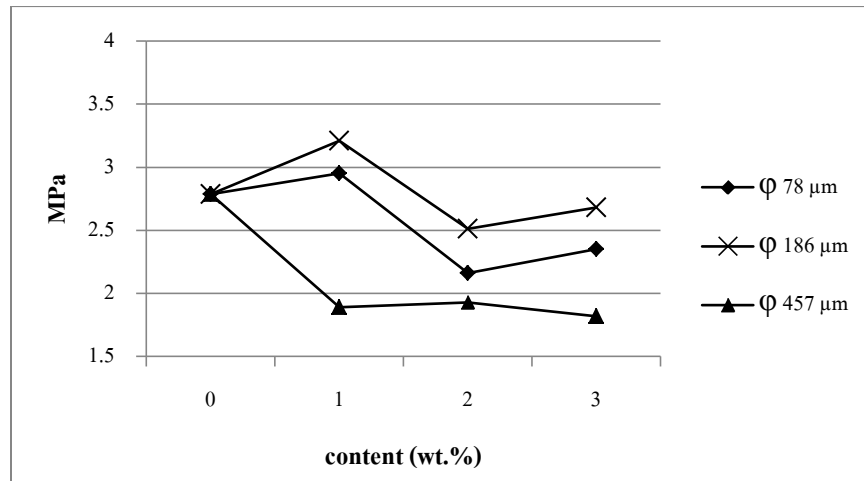
4.10 สมบัติทางกล

4.10.1 สมบัติการรับแรงอัด

สมบัติการรับแรงอัด (Compressive properties) ของโฟมอะลูมิเนียมหาได้จากการเตรียมชิ้นงานโฟมที่มีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm ความสูง 30 mm กำหนดความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน ($\pm 10\%$) เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบผลได้ ในงานวิจัยนี้ค่าความหนาแน่นของโฟมที่ใช้ทดสอบแรงอัดมีค่าระหว่าง 0.55 - 0.6 g/cm³ เนื่องจากชิ้นงานโฟมที่ใช้ในการทดสอบการรับแรงอัดจำเป็นต้องมีขนาดที่เหมาะสม ดังนั้น โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าในบางส่วนผสมจึงไม่สามารถทดสอบการรับแรงอัดได้เนื่องจากการขยายตัวดำเนินไป ได้แก่ โฟมที่ผสมซีเถ้า 4-5 wt.% ทุกชนิดซีเถ้า และ โฟมผสมซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere ทุกปริมาณส่วนผสม

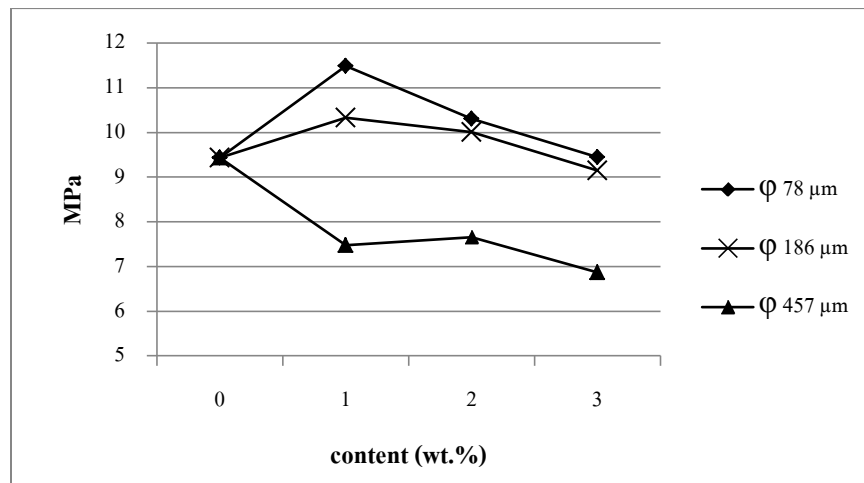
ผลการวิเคราะห์กราฟความเค้น-ความเครียดจะได้ออกมาเป็นค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) ความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau และการดูดซับพลังงานการอัด (Energy absorption) ค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau หาได้จากค่าเฉลี่ยของความเค้นจุดครากและค่าความเค้น ณ 60 % ความเครียด ผลการทดลองวัดจากค่าเฉลี่ยของการทดสอบ 3 ครั้ง

จากรูปที่ 4.33 แสดงค่าความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าเป็ยก พบว่าค่าความเค้นจุดครากของโฟมผสมซีเถ้าเป็ยกขนาด 78 และ 186 μm ปริมาณ 1 wt.% มีค่าความเค้นจุดครากสูงกว่าของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เล็กน้อยและค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้า พิจารณาโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าเป็ยกขนาด 457 μm พบว่ามีค่าความเค้นจุดครากต่ำกว่าโฟมผสมซีเถ้าเป็ยกขนาดอื่นๆและต่ำกว่าค่าความเค้นจุดครากของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์



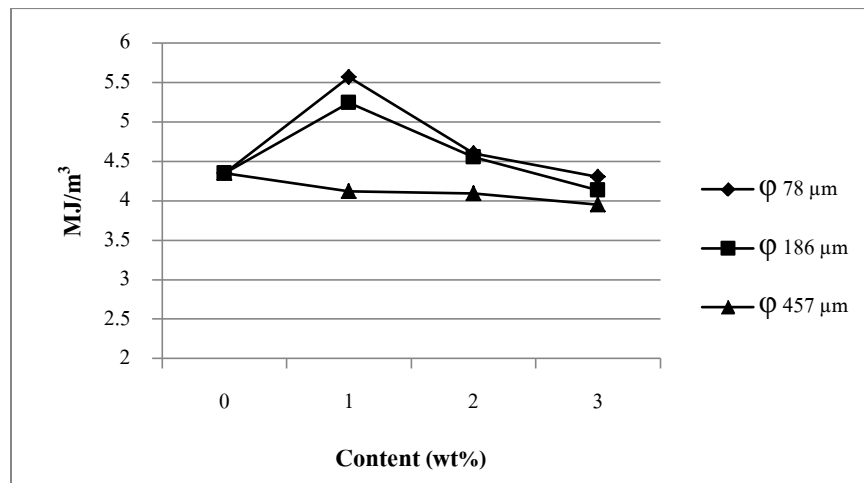
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดครากของโพลีโพรพิลีนชนิดเส้นใยและโพลีโพรพิลีนผสม
เส้นใย

จากรูปที่ 4.34 แสดงค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโพลีโพรพิลีนชนิดเส้นใยและโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใย พบว่าค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ของโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใยขนาด 78 μm ปริมาณ 1 wt.% มีค่าสูงที่สุดและมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย พิจารณาค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ของโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใยขนาด 186 μm พบว่ามีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใย 1 wt.% และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากกว่า 1 wt.% สำหรับโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใยขนาด 457 μm มีค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ต่ำสุดและมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ของโพลีโพรพิลีนชนิดเส้นใย



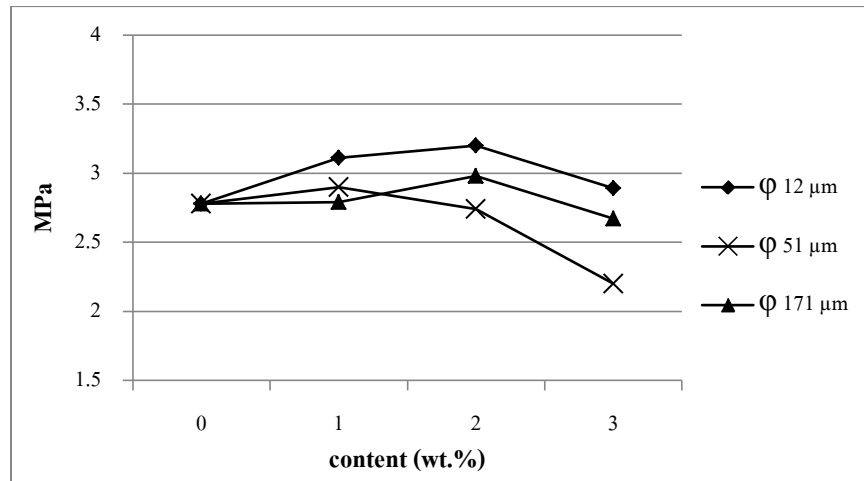
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าเปียก

จากรูปที่ 4.35 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าเปียก พบว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าเปียกขนาดเล็กกว่าจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดได้มากกว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าเปียกขนาดใหญ่ พิจารณาโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าเปียกขนาด 78 μm พบว่า ความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดสูงสุดของโฟมอยู่ที่ส่วนผสมซีเถ้า 1 wt.% และมีค่ามากกว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมที่ผสมซีเถ้ามากกว่า 1 wt.% จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดลดลงตามลำดับ พิจารณาโฟมที่ผสมซีเถ้าเปียกขนาด 186 μm ที่ปริมาณส่วนผสม 1 wt.% พบว่ามีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดสูงสุดและมีค่ามากกว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมที่ผสมซีเถ้ามากกว่า 1 wt.% จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดลดลงตามลำดับ พิจารณาโฟมที่ผสมซีเถ้าเปียกขนาด 457 μm พบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมชนิดนี้คือต่ำกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทุกๆส่วนผสม



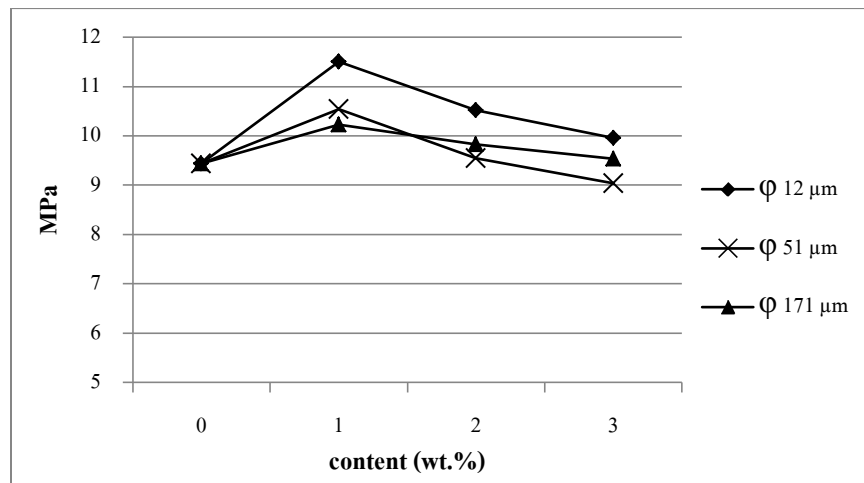
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าการดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียมและโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เปียก

จากรูปที่ 4.36 แสดงค่าความเค้นจุดครากของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator พบว่าค่าความเค้นจุดครากของโพลีที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาด 12 μm จะมีค่าความเค้นจุดครากสูงสุดที่ปริมาณซีเมนต์ 2 wt.% สูงกว่าค่าความเค้นจุดครากของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ค่าความเค้นจุดครากมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากกว่า 2 wt.% พิจารณาค่าความเค้นจุดครากของโพลีผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาด 51 μm พบว่ามีค่าสูงสุดที่ปริมาณส่วนผสม 1 wt.% และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากกว่า 1 wt.% พิจารณาค่าความเค้นจุดครากของโพลีผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาด 171 μm พบว่ามีค่าสูงสุดที่ปริมาณส่วนผสม 2 wt.% และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากกว่า 2 wt.%



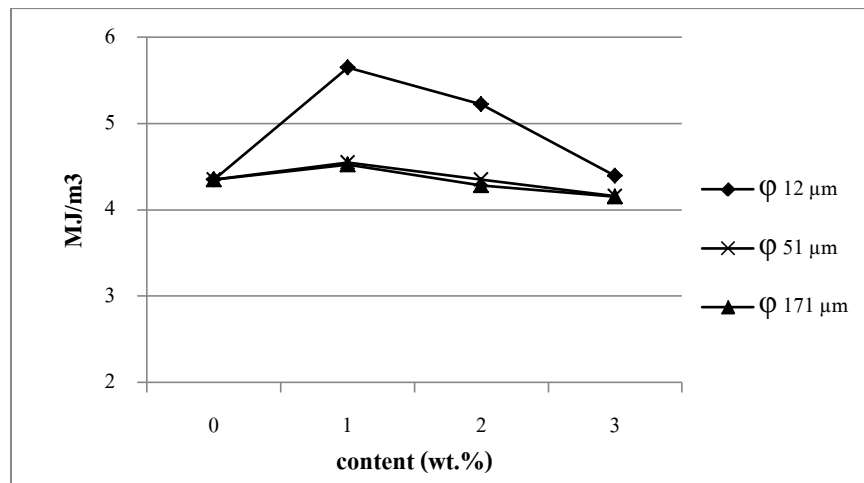
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าความเค้นจุดครากของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตและโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตผสม
ซีดีลลอยชนิด Precipitator

จากรูปที่ 4.37 แสดงค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตและโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตผสมซีดีลลอยชนิด Precipitator พบว่าค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตที่ผสมซีดีลลอยชนิด Precipitator ขนาด 12 μm ที่ปริมาณ 1 wt.% มีค่าสูงสุดและมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อปริมาณซีดีลลอยมากกว่า 1 wt.% พิจารณาความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตผสมซีดีลลอยชนิด Precipitator ขนาด 51 พบว่ามีค่าสูงสุดที่ปริมาณซีดีลลอย 1 wt.% และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณซีดีลลอยมากกว่า 1 wt.% สำหรับค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตผสมซีดีลลอยชนิด Precipitator ขนาด 171 μm มีค่าสูงสุดที่ปริมาณซีดีลลอย 1 wt.% และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณซีดีลลอยมากกว่า 1 wt.% จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นเฉลี่ยช่วง Plateau ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตที่ผสมซีดีลลอยขนาด 51 และ 171 μm มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator

จากรูปที่ 4.38 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator พบว่า โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 12 μm ที่ปริมาณซีเมนต์ 1 wt.% มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุด และมีค่าสูงกว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ความสามารถในการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมซีเมนต์มากกว่า 1 wt.% พิจารณาความสามารถในการดูดซับพลังงานของ โฟมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาด 51 พบว่ามีค่าสูงสุดที่ปริมาณซีเมนต์ 1 wt.% และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ พิจารณาความสามารถในการดูดซับพลังงานของ โฟมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator ขนาด 171 μm พบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน มีค่าสูงสุดที่ปริมาณซีเมนต์ 1 wt.% และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของ โฟมที่ผสมซีเมนต์ขนาด 51 และ 171 μm มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน

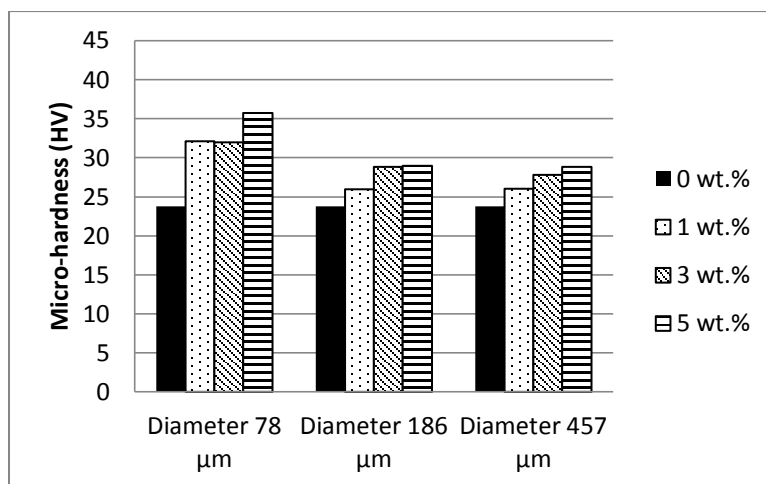


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าการดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียมและโพลีอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าลอยชนิด Precipitator

4.10.2 การทดสอบความแข็ง

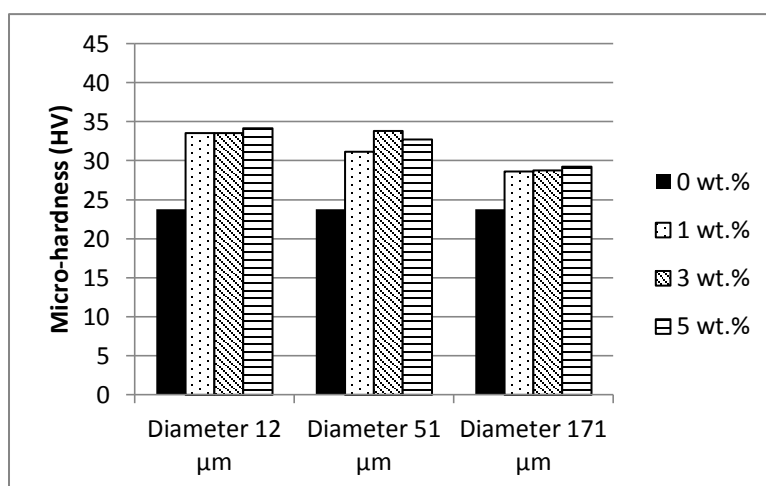
การเตรียมชิ้นงานเพื่อการทดสอบความแข็งระดับจุลภาค ทำได้โดยการขึ้นรูปตัวเรือนแบบเย็น (Cold mount) และขัดผิวชิ้นงานจนถึงระดับความละเอียดของผงเพชรขนาด 1 μm ใช้น้ำหนักกด 25 กรัม เวลาในการกด 10 วินาที ผลที่ได้ 5 ค่านำมาหาค่าเฉลี่ย โดยชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบหาค่าความแข็งนี้ประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 wt.% ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.39 พบว่าอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าเป็ยกที่ทุกขนาดและส่วนผสม มีความแข็งสูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคเดียวกัน พบว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้า และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณส่วนผสมเดียวกัน พบว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง



รูปที่ 4.39 ความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมจีเถ้าเปียก

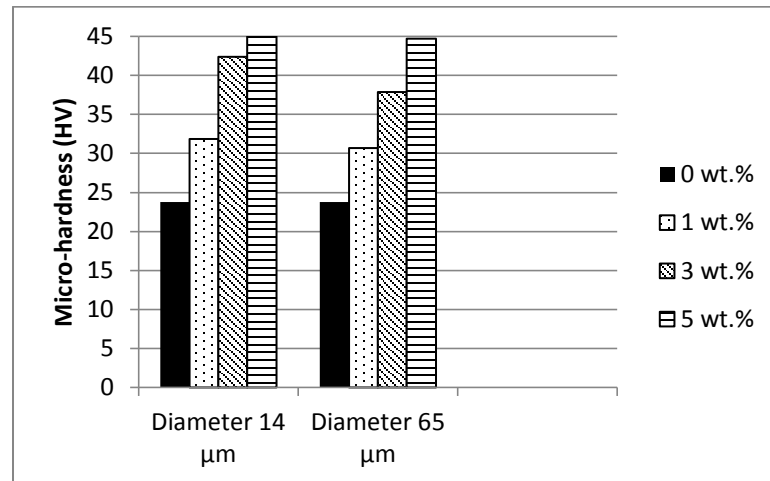
จากรูปที่ 4.40 อะลูมิเนียมผสมจีเถ้าลอยชนิด Precipitator ที่ทุกขนาดและส่วนผสม มีความแข็งสูงกว่าเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคเดียวกัน พบว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณจีเถ้า และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณส่วนผสมเดียวกัน พบว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง



รูปที่ 4.40 ความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมจีเถ้าลอยชนิด Precipitator

จากรูปที่ 4.41 พบว่าอะลูมิเนียมผสมจีเถ้าลอยชนิด Cenosphere ที่ทุกขนาดและส่วนผสมมีความแข็งสูงกว่าเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคเดียวกัน พบว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณจีเถ้า และเมื่อพิจารณาที่ส่วนปริมาณส่วนผสม

เดียวกัน พบว่าความแข็งของเนื้อพื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กกลง จะเห็นได้ว่าความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere นี้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณของอนุภาคเพิ่มขึ้น



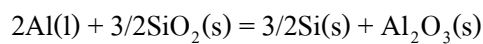
รูปที่ 4.41 ความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมซีเฝ้าลอยชนิด Cenosphere

บทที่ 5

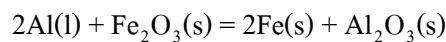
วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 เสถียรภาพทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมผสมซิลิกา

จากการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมผสมซิลิกาชนิดต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิสูง โลหะอะลูมิเนียมมีการทำปฏิกิริยากับซิลิกาทั้ง 3 ชนิด ปฏิกิริยาเคมีระหว่างซิลิกาและอะลูมิเนียมหลอมเหลว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



(5.1)



(5.2)

ที่อุณหภูมิ 700°C ปฏิกิริยาตามสมการที่ (5.1) จะมีค่า Gibbs free energy เท่ากับ -312,683 J/mol และปฏิกิริยาตามสมการที่ (5.2) จะมีค่า Gibbs free energy เท่ากับ -797,295 J/mol [37] จะเห็นได้ว่า Gibbs free energy ของปฏิกิริยามีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้น

พิจารณารูปที่ 4.8 และ 4.9 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมซิลิกา พบว่า ในระหว่างการให้ความร้อนอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C ซึ่งใกล้เคียงกับปฏิกิริยาการหลอมเหลวของอะลูมิเนียม เมื่อพิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมซิลิกาเปียก พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C เช่นกัน และพบปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 723°C พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมซิลิกาลอย Precipitator พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C และพบปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 717°C พิจารณากราฟ DSC ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมซิลิกาลอย ชนิด Cenosphere พบปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 650°C และพบปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 700°C ปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมซิลิกานี้ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะลูมิเนียมหลอมเหลวและซิลิกา ดังสมการที่ 5.1 และ 5.2 ธาตุ Si

และ Fe ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีนั้น จะละลายลงในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและเกิดเป็น โครงสร้างเดนไดรซ์ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.30 จะพบว่ามีโครงสร้างยูเทคติกเดนไดรท์เกิดขึ้นบริเวณรอบๆ กลุ่มอนุภาคซีต์อัลลอยชนิด Precipitator แสดงว่า Si ที่เกิดขึ้นตามสมการ (5.1) เกิดการแพร่ไปยังบริเวณรอบๆอนุภาคซีต์ เมื่อพิจารณากราฟ DSC ขณะเย็นตัว จะพบว่าอะลูมิเนียมผสมซีต์ทั้งสามชนิด เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน 2 ครั้งระหว่างการเย็นตัว ได้แก่ที่อุณหภูมิประมาณ 635°C , 573°C สำหรับ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์เปียกและที่ 641°C , 571°C สำหรับ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์อัลลอยชนิด Precipitator และที่ 642°C , 574°C สำหรับ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์อัลลอยชนิด Cenosphere สาเหตุที่เกิดปฏิกิริยาคายพลังงาน 2 ครั้ง เนื่องจากในระบบสมดุลเฟสของ Al-Si การเย็นตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่มี Si ผสมอยู่ เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าเส้น Liquidus น้ำโลหะจะบางส่วนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะไปเป็นอะลูมิเนียมอัลฟ่าดังนี้



เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาอีกจนถึงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยายูเทคติก (577°C) น้ำโลหะที่เหลือจะเปลี่ยนสถานะไปเป็นอะลูมิเนียมอัลฟ่าและ Si ดังนี้



5.2 ผลของชนิดซีต์ต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม

จากการตรวจสอบการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์ทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาที่ขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกันคือ ซีต์เปียกขนาดเฉลี่ย $78 \mu\text{m}$ ซีต์อัลลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย $51 \mu\text{m}$ และซีต์อัลลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย $65 \mu\text{m}$ พบว่า โฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์อัลลอยชนิด Precipitator 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดที่ 425 % รองลงมาคือ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์เปียก 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดที่ 409 % ถัดมาคือ โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 378 % และ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์อัลลอยชนิด Cenosphere มีการขยายตัวต่ำที่สุด 274 % การขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีต์เปียกและซีต์อัลลอยชนิด Precipitator มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ สาเหตุที่ โฟมผสมซีต์ทั้งสองชนิดมีการขยายตัวสูงกว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เนื่องจากอนุภาคซีต์ช่วยเพิ่มความหนืดให้กับน้ำโลหะ ทำ

ให้โพรงอากาศมีเสถียรภาพมากกว่าแต่โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere มีขนาดการขยายตัวต่ำกว่ามาก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและจำนวนอนุภาคที่มีอยู่ จะได้สมการดังนี้ [24]

$$N = \frac{V_a}{V_p} \quad (5.5)$$

โดยที่ N คือ จำนวนอนุภาค

V_a คือ ปริมาตรของอนุภาคทั้งหมด

V_p คือ ปริมาตรของอนุภาค 1 อนุภาค

เมื่อพิจารณาตัวแปรจากสมการข้างต้น พบว่าจำนวนอนุภาคจะแปรผันตามปริมาตรของอนุภาค ดังนั้นที่น้ำหนักเท่ากัน ปริมาตรของซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere จะมีจำนวนอนุภาคมากกว่าซีเมนต์อีก 2 ชนิดมาก เนื่องจากซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere เป็นอนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำ ($0.4 - 0.7 \text{ g/cm}^3$) ขณะที่ซีเมนต์เปียกและซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator จะมีความหนาแน่นสูงกว่า ($2.0 - 3.0 \text{ g/cm}^3$) [35] การมีอนุภาคเซรามิกในโลหะหลอมเหลว จะทำให้โลหะหลอมเหลวมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้ฟองอากาศได้ แต่การที่โลหะหลอมเหลวมีความหนืดมากเกินไปจะส่งผลต่อการขยายตัวของโฟม ทำให้ไม่เกิดการขยายตัวเป็นโฟมหรือการขยายตัวต่ำ ดังนั้นสาเหตุที่โฟมผสมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere มีการขยายตัวต่ำ น่าจะเป็นเพราะความหนืดที่มากเกินไปเนื่องจากจำนวนอนุภาคมีจำนวนมากเกินไป

สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere มีการขยายตัวต่ำเนื่องจาก ซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere เป็นซีเมนต์ที่มีลักษณะกลวง ดังนั้นในระหว่างขั้นตอนการอัดผงโลหะให้เป็นชิ้นงาน Precursor ซีเมนต์ลอยชนิดนี้จะแตกและสร้างทางเดินของช่องว่างเชื่อมต่อกันระหว่างซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ด้วยกัน ทำให้เกิด H_2 ที่เกิดระหว่างการให้ความร้อนชิ้นงาน Precursor สามารถไหลผ่านช่องว่างเหล่านี้ออกจากชิ้นงานได้

5.3 ผลของขนาดและปริมาณของอนุภาคต่อการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียม

จากการศึกษาผลของขนาดขี้เถ้าที่มีต่อการขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียม พบว่าขี้เถ้าทั้งสามชนิดแสดงพฤติกรรมการขยายตัวเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ การขยายตัวของโพลีมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดที่มีต่อปริมาตรของอนุภาคขี้เถ้า จะได้ดังสมการที่ (5.6) [24]

$$V_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad (5.6)$$

โดยที่ V_p คือ ปริมาตรของอนุภาค

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

นำสมการ (5.6) แทนค่าใน (5.5) จะได้

$$N = \frac{6V_a}{\pi} d_p^{-3} \quad (5.7)$$

เมื่อพิจารณาตัวแปรจากสมการข้างต้น พบว่าจำนวนอนุภาคจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค ดังนั้นเมื่อเทียบที่น้ำหนักเท่ากัน การที่อนุภาคมีขนาดเล็กลงจะทำให้จำนวนอนุภาคเพิ่มมากขึ้น และทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคและน้ำโลหะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ความหนืดของน้ำโลหะสูงเกินไป ทำให้การขยายตัวของโพลีดำหรือไม่เกิดการขยายตัว ดังเช่นโพลีอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้าลอยชนิด Cenosphere ขนาดเฉลี่ย 14 μm ซึ่งมีการขยายตัวของโพลีดำมากสำหรับโพลีที่มีส่วนผสมของขี้เถ้า 1 wt.% และไม่มีมีการขยายตัวของโพลีดำที่ส่วนผสมมากกว่า 1 wt.% ขึ้นไป

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโพลีอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้าลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm พบว่า มีการขยายตัวต่ำกว่าโพลีอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้าลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm อยู่เล็กน้อย สาเหตุน่าจะมาจากการที่อนุภาคขี้เถ้าลอยชนิด Precipitator ขนาดใหญ่มักจะมีความหนาแน่นต่ำและมีความพรุนอยู่ในขี้เถ้าปริมาณมาก [38] ดังนั้นจากสมการที่ (5.5) จะพบว่าจำนวนอนุภาคขี้เถ้าภายในโพลีจึงมากตามไปด้วย ทำให้โลหะหลอมเหลวมีความหนืดมาก อีกทั้งอนุภาคขนาดเฉลี่ย 171 μm ยังมีความพรุนมากทำให้แก๊สที่แตกตัวอาจหนีออกจากชิ้นงานผ่านทางรูพรุนดังกล่าว นอกจากนี้ การแตกหักเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยของอนุภาคขี้เถ้า ดังรูปที่ 4.31(ข) อาจทำให้

ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์และน้ำโลหะเพิ่มขึ้น

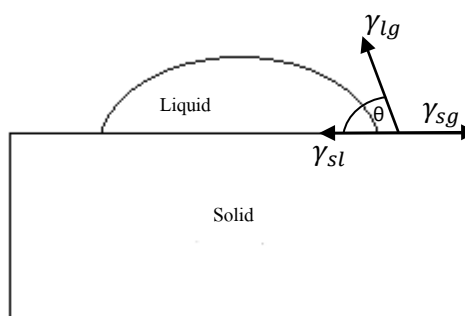
ในส่วนของผลของปริมาณซีเมนต์ที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม พบว่าซีเมนต์ทั้งสามชนิดแสดงพฤติกรรมการขยายตัวเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือการขยายตัวของโฟมจะสูงสุดที่ปริมาณซีเมนต์ 1 wt.% และการขยายตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์มากกว่า 1 wt.% สาเหตุเนื่องจากการผสมซีเมนต์ปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความหนืดของน้ำโลหะสูงขึ้น และทำให้ความสามารถในการขยายตัวของ โฟมลดต่ำลง นอกจากนี้การแตกหักของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูป ทำให้ซีเมนต์แตกเป็นชิ้นเล็กๆเกาะกลุ่มกันและเกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Void) อยู่ระหว่างซีเมนต์ที่รวมกลุ่มกันอยู่ ดังรูปที่ 4.24 เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่องว่างดังกล่าวมีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย จึงเกิดการสูญเสียแก๊ส H_2 ผ่านทางช่องว่างเหล่านี้ออกไป ทำให้ความสามารถในการขยายตัวของโฟมลดต่ำลง

อย่างไรก็ตาม จากการตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน Precursor พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทุกชิ้นมีค่ามากกว่า 98 % ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่ามีความพรุนอยู่ภายในอนุภาคซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิด นอกเหนือจากซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่มีลักษณะกลวงอยู่แล้ว ถึงแม้ว่าอนุภาคซีเมนต์เป็ยอกและซีเมนต์ลอยชนิด Precipitator จะมีความหนาแน่นสูงและจมใต้น้ำในขั้นตอนการคัดแยกอนุภาคก็ตาม

5.4 ผลของซีเมนต์ที่มีต่อโครงสร้างของโฟม

จากผลการศึกษาผลของอนุภาคซีเมนต์ในโฟมต่อโครงสร้างของโฟม พบว่าการเติมซีเมนต์ในปริมาณระหว่าง 1-3 wt.% จะช่วยให้โครงสร้างของโฟมมีความสม่ำเสมอดีขึ้นเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โพรงอากาศมีจำนวนมากขึ้นและมีขนาดเล็กกลง ยกเว้น โฟมที่ผสมซีเมนต์ลอยชนิด Cenosphere ที่ทุกขนาดและส่วนผสมซึ่งโครงสร้างที่ได้ไม่ดีโดยโพรงอากาศจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และรูปร่างของโฟมจะมีลักษณะบิดเบี้ยว อีกทั้งยังมีการขยายตัวต่ำมาก การที่โพรงอากาศมีจำนวนมากขึ้นและมีขนาดเล็กกลง แสดงว่าการเติมอนุภาคซีเมนต์ลงใน โฟมช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโพรงอากาศและลดความหยาบของโครงสร้างโพรงอากาศใน โฟม โดยอนุภาคซีเมนต์จะขัดขวางการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมและทำให้น้ำโลหะมีความหนืดเพิ่มขึ้น

นอกจากการเพิ่มความหนืดให้กับน้ำโลหะแล้ว ความสามารถในการเปียกของน้ำโลหะต่ออนุภาคก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างเสถียรภาพในโฟม เพื่อให้การสร้างเสถียรภาพเกิดประสิทธิภาพสูงสุด อนุภาคที่เติมควรกระจายตัวอยู่เต็มภายในเนื้อพื้นโลหะและบริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำโลหะ-แก๊ส ซึ่งอนุภาคที่จะสามารถแสดงพฤติกรรมดังนี้ได้ จะต้องมีค่าความสามารถในการเปียกที่เหมาะสมในน้ำโลหะ จากทฤษฎี liquid droplet entrainment theory [36] ได้อธิบายไว้ว่าการที่อนุภาคในน้ำโลหะจะสามารถเคลื่อนตัวไปยังผิวสัมผัสระหว่างน้ำโลหะ-แก๊สจะเกิดขึ้นได้ต้องเป็นไปตามสมการดังนี้



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการเปียกของของเหลวบนของแข็ง

$$\gamma_{lg} + \gamma_{sl} > \gamma_{sg} \quad (5.8)$$

ความสามารถในการเปียกของน้ำโลหะนี้ สามารถหาได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของยัง (Young's equation) ดังนี้

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cdot \cos\theta \quad (5.9)$$

โดยที่ γ_{sg} คือ แรงตึงผิวของของแข็ง

γ_{lg} คือ แรงตึงผิวของของเหลว

γ_{sl} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

θ คือ มุมสัมผัส

เมื่อนำค่าในสมการที่ (5.9) ไปแทนค่าในสมการที่ (5.8) จะได้

$$\gamma_{lg} > \gamma_{lg} \cos \theta \quad (5.10)$$

มุมสัมผัส (θ) เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการเปียกของอนุภาค ถ้า θ มีค่าเท่ากับ ศูนย์ จะเป็นการเปียกอย่างสมบูรณ์ ของเหลวจะแผ่กระจายครอบคลุมพื้นผิวของของแข็ง ถ้า θ มีค่าเท่ากับ 180° แสดงว่าของเหลวไม่มีความสามารถในการเปียกบนของแข็งเลย หดของเหลวจะรวมตัวเป็นรูปทรงกลมอยู่บนของแข็ง ทั้งนี้ เกณฑ์ในการพิจารณาว่าความสามารถในการเปียกดีหรือไม่ดีนั้น อาจใช้ค่า θ ที่ 90° ถ้า θ มีค่าน้อยกว่า 90° แสดงว่าอนุภาคมีความสามารถในการเปียกที่ดีกับของเหลว

สมการ (5.10) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ θ มีค่ามากกว่า 0 จนถึง 180° แสดงว่าอนุภาคที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังผิวสัมผัสระหว่างน้ำโลหะ-แก๊ส จะต้องไม่มีความสามารถในการเปียกที่สมมูลกับน้ำโลหะ มีรายงานว่าความสามารถในการเปียกของจี้เถ้าลอยกับน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ 800°C เท่ากับ 111° [39] สำหรับจี้เถ้าเปียกนั้น ค่าความสามารถในการเปียกน่าจะมีค่าใกล้เคียงกับจี้เถ้าลอยเนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของจี้เถ้าทั้งสองชนิดมีความคล้ายคลึงกัน จากรูปที่ 4.30, 4.31 และ 4.32 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคจี้เถ้าทั้ง 3 ชนิด ส่วนใหญ่จะเกาะอยู่ตามขอบโพรงอากาศ แสดงว่าจี้เถ้าทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติเปียกที่ไม่ดีกับน้ำโลหะอะลูมิเนียม (มี θ มากกว่า 90°) ดังนั้นอนุภาคจะถูกน้ำอะลูมิเนียมผลักออกมาอยู่บริเวณผิวสัมผัสของน้ำโลหะ-แก๊ส อนุภาคที่ถูกผลักออกมาอยู่บริเวณผิวสัมผัสนี้จะช่วยปรับความโค้งของผนังโพรงอากาศและทำให้ Capillary pressure ระหว่างบริเวณผนังโพรงอากาศและ Plateau border ลดลง ดังสมการของ V. Gergely และ T.W. Clyne [40]

$$\Delta p = \frac{\gamma}{r_{PB}} \quad (5.11)$$

โดยที่ Δp คือ ความแตกต่างของความดันระหว่างก้นโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border

γ คือ แรงตึงผิวของน้ำโลหะ

r_{PB} คือ รัศมีความโค้งของโพรงอากาศ

ดังนั้น จะพบว่า การปรับรัศมี ความโค้งของ โพรงอากาศ จะทำให้การไหลของน้ำไหลหายไปยัง Plateau border ลดลง ปรากฏการณ์นี้จะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นสำหรับ โฟมที่ผสมขี้เถ้าขนาดใหญ่ จากรูปที่ 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 และ 4.25 พบว่าขนาดเฉลี่ยของโพรงอากาศของโฟมที่ผสมขี้เถ้าขนาดใหญ่มีแนวโน้มเล็กกว่าของโฟมที่ผสมขี้เถ้าขนาดเล็กกว่า รวมถึงจำนวนโพรงอากาศที่มีปริมาณมากกว่า แสดงว่าขี้เถ้าขนาดใหญ่มีความสามารถในการยับยั้งการพังตัวของโพรงอากาศได้ดีกว่าขี้เถ้าขนาดเล็กเมื่อเกิดที่น้ำหนักเท่ากัน อาจเป็นเพราะขี้เถ้าขนาดใหญ่สามารถขัดขวางการไหลของน้ำไหลได้ดีกว่าขี้เถ้าขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม ที่น้ำหนักเท่ากันขี้เถ้าขนาดใหญ่จะมีจำนวนอนุภาคน้อยกว่าขี้เถ้าขนาดเล็ก จึงเป็นข้อจำกัดของการเปรียบเทียบโครงสร้างโฟม

อีกหนึ่งสิ่งที่ตรวจสอบได้จากการตรวจสอบ โครงสร้างระดับจุลภาคคือ ลักษณะการพังตัวของขี้เถ้าภายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม จากรูปที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 พบว่ามีการแตกหักของอนุภาคซึ่งเกิดระหว่างขั้นตอนการอัดขึ้นรูป โดยที่อนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มจะเกิดการแตกหักมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก แสดงว่าอนุภาคขนาดเล็กมีความต้านทานต่อการแตกหักมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ สำหรับอนุภาคขี้เถ้าลอยชนิด Cenosphere ซึ่งพบว่าอนุภาคขี้เถ้าส่วนใหญ่เกิดการแตกหักจนละเอียดนั้น สาเหตุเนื่องจากลักษณะรูปทรงของขี้เถ้าลอยชนิด Cenosphere เป็นรูปทรงกลมกลวง จึงทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการแตกหักต่ำกว่าขี้เถ้าเปียกและขี้เถ้าลอยชนิด Precipitator

5.5 ผลของขี้เถ้าต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

5.5.1 ความแข็งแรงความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดของโฟมอะลูมิเนียม

ความแข็งแรงของโฟมโลหะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ โลหะที่ใช้ผลิตโฟม ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ขนาด รูปร่าง และความสม่ำเสมอของโพรงอากาศ รวมถึงตำแหน่งที่เกิดขึ้นภายในโฟม แต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการเติมอนุภาคขี้เถ้าลงไป ในโฟมด้วย ดังนั้น ปัจจัยต่างๆซึ่งเกี่ยวข้องกับอนุภาคเสริมแรง เช่น ขนาด ปริมาณ และ พฤติกรรมการกระจายตัวของขี้เถ้าภายในชิ้นงาน จึงมีผลต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน

สำหรับความสามารถในการดูดซับพลังงานของโพนัน สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดภายในช่วงความเครียดที่กำหนด ดังนั้น โพนันที่มีความเค้นจุดครากและความแข็งแรงในช่วงความเค้น Plateau สูง ก็จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงตามไปด้วย

ผลการทดสอบความเค้นจุดคราก ความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau และความสามารถในการดูดซับพลังงานของโพนันอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพนันผสมซีเมนต์ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 และ 4.38 เมื่อพิจารณาความเค้นจุดครากของโพนันจะพบว่าค่าความเค้นของโพนันอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพนันอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau จะพบความแตกต่างระหว่างโพนันอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพนันอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากัน ความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของโพนันอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21, 4.23, 4.24 และ 4.25 พบว่าที่ส่วนผสมเท่ากัน โพรงอากาศของโพนันที่ผสมซีเมนต์ขนาดเล็ก จะมีแนวโน้มใหญ่กว่าและมีความสม่ำเสมอน้อยกว่าโพนันที่ผสมซีเมนต์ขนาดใหญ่ ดังนั้นในกรณีนี้ ขนาดของอนุภาคเสริมแรงจึงมีผลต่อสมบัติทางกลของโพนันมากกว่าขนาดและความสม่ำเสมอของโพรงอากาศ การที่โพนันมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลงเนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคจะน้อยลงเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง ดังสมการนี้ [41]

$$\lambda = \frac{4(1-f)r}{3f} \quad (5.12)$$

โดยที่ λ คือระยะห่างระหว่างอนุภาค

f คือสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค

r คือรัศมีของอนุภาค

การที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง จะทำให้ต้องใช้แรงในการเคลื่อนดิสโลเคชันผ่านอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุผสมเพิ่มขึ้น ดังสมการนี้ [41]

$$\tau = \frac{Gb}{\lambda} \quad (5.13)$$

โดยที่ τ คือ แรงที่ใช้ในการเคลื่อนดิสโลเคชันผ่านอนุภาคเสริมแรง

G คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

b คือ Berger's vector

สาเหตุอีกประการหนึ่งซึ่งทำให้โฟมผสมอนุภาคขนาดเล็ก มีแข็งแรงมากกว่าโฟมที่ผสมอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่จะสร้างความเสียหายแก่ชิ้นงานมากกว่า โดยอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 เนื่องจากบริเวณรอบอนุภาคขนาดใหญ่จะมีความเข้มข้นของสนามความเค้น มากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก อีกทั้งการรวมเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขี้เถ้าที่เกิดการแตกหักก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของโฟมลดลงอีกด้วย เนื่องจากความเสียหายมีแนวโน้มจะเริ่มเกิดบริเวณที่อนุภาครวมกลุ่มอยู่ [42] ดังนั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 4.34 จะพบว่ากรณีที่โฟมผสมขี้เถ้าเป็ยกขนาดเฉลี่ย 457 μm มีค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ต่ำที่สุดและต่ำกว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น

พิจารณาผลของปริมาณอนุภาคที่มีต่อค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโฟม พบว่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโฟมอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้าทั้งสองชนิดมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณขี้เถ้าเท่ากับ 1 wt.% และมีค่าสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทุกขนาดอนุภาค ยกเว้น โฟมอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้าเป็ยกขนาดเฉลี่ย 457 μm ความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ของโฟมที่ผสมอนุภาคขี้เถ้ามากกว่า 1 wt.% มีแนวโน้มลดลง สาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของรูพรุนขนาดเล็ก (void) ที่เกิดขึ้นจากการเติมขี้เถ้า ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 เมื่อปริมาณขี้เถ้าเพิ่มขึ้น รูพรุนเหล่านี้จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งการเพิ่มปริมาณขี้เถ้ายังทำให้สัดส่วนของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการแตกหักของขี้เถ้าเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างโฟมที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้า ก็มีผลทำให้สมบัติทางกลลดลงเช่นกัน

พิจารณาความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมขี้เถ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.38 พบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคซีเถ้าเล็กลง และถ้าพิจารณาที่ขนาดของอนุภาคเดียวกัน พบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณซีเถ้าเท่ากับ 1 wt.% ความสามารถในการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้ามากกว่า 1 wt.% จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโพลีเมอร์ จะมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกับค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วง Plateau ดังรูปที่ 4.34 และ 4.36 เนื่องจากความสามารถในการดูดซับพลังงานเป็นค่าที่คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ดังนั้น โพลีเมอร์ที่มีความเค้นในช่วง Plateau สูง ก็จะสามารถในการดูดซับพลังงานสูงตามไปด้วย

5.5.2 ความแข็งระดับจุลภาค

จากรูปที่ 4.39, 4.40 และ 4.41 แสดงผลการทดสอบความแข็งด้วยวิธีการวัดความแข็งแบบ Micro-Vicker ผลการทดสอบแสดงว่าเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าทุกขนาดและปริมาณมีความแข็งสูงกว่าเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคเท่ากันจะพบว่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีเถ้าเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจากการเติมอนุภาคซีเถ้าซึ่งมีความแข็งสูงกว่าความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียม จะช่วยเพิ่มความแข็งให้แก่เนื้อพื้นอะลูมิเนียม โดยอนุภาคซีเถ้าจะช่วยต้านทานการเปลี่ยนรูปของเนื้อพื้น การเพิ่มปริมาณซีเถ้าจะทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคภายในเนื้อพื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่ส่วนผสมเท่ากัน ความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าขนาดเล็กมีแนวโน้มสูงกว่าความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าขนาดใหญ่ สาเหตุเนื่องจากซีเถ้าขนาดเล็กจะมีจำนวนอนุภาคมากกว่าซีเถ้าขนาดใหญ่เมื่อคิดที่น้ำหนักเท่ากันดังสมการที่ (5.7) ทำให้มีอนุภาคกระจายตัวอยู่ภายในเนื้อพื้นมากกว่า ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การกระจายตัวของอนุภาคภายในเนื้อพื้น

เมื่อพิจารณาความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere พบว่ามีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้า สาเหตุอาจเป็นเพราะเมื่อคิดที่น้ำหนักเท่ากัน จำนวนอนุภาคซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere นั้นมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับซีเถ้าเปียกและซีเถ้าลอยชนิด Precipiator จึงทำให้มีซีเถ้ากระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นปริมาณมาก อีกทั้งการแตกหักของซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere เป็นชิ้นเล็กลง ยังส่งผลให้ความแข็งของเนื้อพื้นมีค่าสูงยิ่งขึ้นไปอีก

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งคือความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของเนื้อพื้นและความแข็งแรงในช่วง plateau ของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้า พบว่าความแข็งแรงในช่วง plateau ของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีเถ้ามากกว่า 1 wt.% ขึ้นไป ในขณะที่ความแข็งของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้ายิ่งขึ้นไป

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

1. จี๊เจ้าเปียกมีผลทำให้การขยายตัวของโฟมเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อผสมจี๊เจ้าปริมาณ 1 wt.% และสูงกว่าการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณจี๊เจ้ามากกว่า 1 wt.% และเมื่อขนาดของจี๊เจ้าลดลง

2. จี๊เจ้าลอยชนิด Precipitator มีผลทำให้การขยายตัวของโฟมเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อผสมจี๊เจ้าปริมาณ 1 wt.% และสูงกว่าการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณจี๊เจ้ามากกว่า 1 wt.% ที่ปริมาณจี๊เจ้าเท่ากัน โฟมผสมจี๊เจ้าที่มีการขยายตัวสูงสุดคือ โฟมที่ผสมจี๊เจ้าขนาดเฉลี่ย 51 μm รองลงมาคือ โฟมที่ผสมจี๊เจ้าขนาดเฉลี่ย 12 μm ตามด้วยโฟมที่ผสมจี๊เจ้าขนาดเฉลี่ย 171 μm

3. จี๊เจ้าลอยชนิด Cenosphere มีผลทำให้การขยายตัวของโฟมลดต่ำลงทุกขนาดและปริมาณจี๊เจ้า การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณจี๊เจ้าและเมื่อขนาดของจี๊เจ้าลดลง

4. การผสมจี๊เจ้าเปียกและจี๊เจ้าลอยชนิด Precipitator ที่ปริมาณ 1-2 wt.% มีผลช่วยให้โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคขนาดใหญ่จะมีโครงสร้างสม่ำเสมอกว่า โฟมที่ผสมอนุภาคจี๊เจ้าขนาดเล็กและเมื่อเพิ่มปริมาณจี๊เจ้ามากกว่า 2 wt.% ขึ้นไป ความสม่ำเสมอของโครงสร้างโฟมมีแนวโน้มลดลง สำหรับโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมจี๊เจ้าลอยชนิด Cenosphere นั้นมีความสม่ำเสมอน้อยกว่า โครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่ทุกขนาดและปริมาณของจี๊เจ้า

5. การขยายตัวที่เพิ่มขึ้นและโครงสร้างที่สม่ำเสมอมากขึ้นของโฟม เกิดจากการที่อนุภาคจี๊เจ้าช่วยเพิ่มความหนืดให้แก่ น้ำโลหะอะลูมิเนียมและช่วยสร้างเสถียรภาพแก่โฟมชั่วขณะหนึ่ง

อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคปริมาณมากเกินไปจะทำให้ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมสูงเกินไปจนทำให้การขยายตัวลดต่ำลงและโครงสร้างของโฟมไม่สม่ำเสมอ

6. อนุภาคซีเถ้าภายในโฟมอะลูมิเนียม มีแนวโน้มที่จะฝังตัวอยู่บริเวณขอบก้านโพรงอากาศ โดยเฉพาะโฟมอะลูมิเนียมที่อนุภาคซีเถ้าขนาดใหญ่ ซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่จะฝังตัวอยู่บริเวณขอบก้านโพรงอากาศเกือบทั้งหมด ซึ่งการที่อนุภาคซีเถ้าฝังตัวอยู่ตามผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับแก๊ส จะช่วยปรับความโค้งของโพรงอากาศและทำให้ Capillary pressure ระหว่างบริเวณผนังโพรงอากาศและ Plateau border ลดลง

7. การเติมซีเถ้าเปียกและซีเถ้าลอยชนิด Precipitator มีผลทำให้ความแข็งแรงในช่วง Plateau ของโฟมเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อผสมซีเถ้าปริมาณ 1 wt. % และสูงกว่าความแข็งแรงในช่วง Plateau ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ยกเว้น โฟมที่ผสมซีเถ้าเปียกขนาดเฉลี่ย 457 μm ความแข็งแรงของ โฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้ามากกว่า 1 wt. %

8. ที่ปริมาณซีเถ้าเท่ากัน โฟมที่ผสมซีเถ้าขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงมากกว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าขนาดใหญ่

9. การเติมซีเถ้าเปียกและซีเถ้าลอยชนิด Precipitator มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อผสมซีเถ้าปริมาณ 1 wt. % และสูงกว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ยกเว้น โฟมที่ผสมซีเถ้าเปียกขนาดเฉลี่ย 457 μm ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้ามากกว่า 1 wt. %

10. ที่ปริมาณซีเถ้าเท่ากัน โฟมที่ผสมซีเถ้าขนาดเล็กจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานมากกว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าขนาดใหญ่

11. การเติมซีเถ้าเปียก ซีเถ้าลอยชนิด Precipitator และซีเถ้าลอยชนิด Cenosphere มีผลทำให้ความแข็งแรงของเนื้อฟองเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อฟองอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีเถ้า เนื้อฟองอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อฟองอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าขนาดใหญ่

12. อนุภาคซีเมนต์ภายในเนื้อพื้นโพลีอะลูมิเนียม ช่วยเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับโพลี โดยการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน อย่างไรก็ตามการเติมซีเมนต์ปริมาณมากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงของโพลีลดลงเนื่องจากความเสียหายของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นจากการแตกหักของซีเมนต์ระหว่างการอัดขึ้นรูป อีกทั้งเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ ปริมาณรูพรุนขนาดเล็กภายในชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นและความสม่ำเสมอของโครงสร้างโพลีมีแนวโน้มลดลงอีกด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือซีเมนต์จากโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด ซึ่งในปัจจุบันข้อมูลสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์ยังมีไม่มากนัก เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าความถ่วงจำเพาะ ผลของขนาดอนุภาคต่อส่วนประกอบทางเคมี สมบัติทางกล เป็นต้น ดังนั้น การศึกษาสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์โดยละเอียดจึงมีความจำเป็น เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆต่อไป

ในระหว่างขั้นตอนการผลิตโพลีอะลูมิเนียมโดยวิธีการโลหะผงนั้น มีปัจจัยต่างๆหลายปัจจัยที่ส่งผลทำให้การผลิตมีความเสถียรค่อนข้างต่ำ เช่น ปริมาณออกไซด์ในผงอะลูมิเนียม อุณหภูมิที่ไม่คงที่ภายในเตา ความชื้นของวัสดุที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้ความสามารถในการผลิตซ้ำของโพลีค่อนข้างต่ำและทำให้การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของโพลีทำได้ยากด้วย ถ้าหากสามารถควบคุมการผลิตโพลีให้มีคุณภาพใกล้เคียงกันได้แล้ว จะสามารถเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของโพลีได้อย่างสะดวกและชัดเจนยิ่งขึ้น

ในระหว่างการผลิตชิ้นงาน Precursor ภายหลังจากอัดขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว พบว่าเกิดการแตกหักของอนุภาคซีเมนต์ภายในชิ้นงานอย่างมาก ซึ่งซีเมนต์ที่แตกหักนี้จะส่งผลต่อการขยายตัว โครงสร้างและสมบัติทางกลของโพลี ดังนั้นการลดความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อลดการแตกหักของซีเมนต์โดยที่ความหนาแน่นของชิ้นงานยังคงเดิม อาจช่วยปรับปรุงความสามารถในการขยายตัวและสมบัติทางกลของโพลีได้ นอกจากนี้ควรจะมีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของสัดส่วนซีเมนต์ที่แตกหักที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม รวมถึงผลกระทบของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติทางกลและการขยายตัวของโพลีด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] เสกศักดิ์ อัสสวะวิสิทธิ์ชัย. เอกสารประกอบการสอนวิชาโลหะเซลล์ลู่ว่าง
- [2] Banhart, J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams.
Progress in Materials Science 46 (2001) : 559-632.
- [3] Ashby, M.F., Evans, A., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and Wadley, H.N.G.
Metal Foams A Design Guide. USA : Butterworth-Heinemann (2000).
- [4] Baumgartner, F., Duarte, I., and Banhart, J. Advanced Engineering Materials 2 (2000) : 168.
- [5] Baumeister, J. German Patent DE. 40. 18. (1990) : 360.
- [6] Banhart, J. Europhys News. 30 (1999) : 17.
- [7] Gergely, V., Degischer, H.P., and Clyne, T.W. Recycling of MMCs and production of
metallic foams. Comprehensive Composite Materials 3 (2000) : 1-24.
- [8] Kennedy, A.R., and Asavavisitchai, S. Foaming of compacted Al-TiH₂ powder mixtures.
Materials Science 396-402 (2002) : 251-258.
- [9] Kennedy, A.R. The effect of compaction on expansion and gas release in Al-TiH₂ powder
compacts. Materials Science 416 (2003) : 299-304.
- [10] Elbir, S., Yilmaz, S., Toksoy, A.K., Guden, M., and Hall, I.W. SiC-paticulate aluminum
composite foams produced from powder compacts: foaming and compression
behavior. J Master Sci 41 (2006) : 4075-4084.
- [11] Babcsan, N., Leitmeier, D., and Degischer, H.P. Foamability of particle reinforced
aluminium melt. Mat.-wiss. U. Wekstofftech 34 (2003) : 22-29.
- [12] Schoenfelder, C.W., and Swisher, J.H. Kinetics of Thermal Decomposition of TiH₂. J. Vac.
Sci. Technol 10(5) 1973 : 862-870.
- [13] Bhosle, V., et al. Dehydrogenation of TiH₂. Material Science and Engineering A 356(1-2)
(2003) : 190-199.

- [14] Yang, C.C., and Nakae, H. Foaming characteristics control during production of aluminium alloy foam. Journal of Alloys and Compounds 313(1-2) (2000) : 188-191.
- [15] Kennedy, A.R. The effect of TiH₂ heat treatment on gas release and foaming in Al- TiH₂ preforms. Scripta Materialia 47 (2002) : 763-767.
- [16] Kenedy, A.R., and Lopez, V.H. The decomposition behavior of as-recived and oxidized TiH₂ foaming-agent powder. Materials Science and Engineering A 357(1-2) (2003) : 258-263.
- [17] Von Zeppelin, F., Hirscher, M., Stanzick, H., and Banhart, J. Desorption of hydrogen from blowing agents used for foaming metals. Composites Science and Technology 63 (2003) : 2293-2300.
- [18] Youn, S.W., Kang, C.G. The effect of process parameters on cell morphology in cellular aluminium alloy fabricated by powder compression and the induction heating process. Professional Engineering Publishing 217 (2003) : 201-211.
- [19] Duarte, I., and Banhart, J. A study of aluminium foam formation-kinetics and microstructure. Acta Materialia 48(9) (2000) : 2349-2362.
- [20] Simancik, F., et al. Effect of foaming parameters on the pore size. Proceedings of the 2nd International Conference (MetFoam'99) : Metal Foams and Porous Metal Structures (1999). Bremen, Germany: MIT-Verlag.
- [21] Simancik, F., Behulova, K., and Bors, L. Effect of ambient atmosphere on metal foam expansion. In Proceeding of the 2nd International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology (2001). Bremen, Germany: MIT-Verlag.
- [22] Van Horn, K.R., Aluminium, Volume 1 : Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams. American Society for Metals (1967).
- [23] BanHart, J. Metal foams : Production and stability. Advanced Engineering Materials 8(9) (2006) : 781-794.

- [24] Ip, S.W., Wang, Y., and Toguri, J.M. Aluminium foam stabilization by solid particles. Canadian Metallurgical Quarterly 38(1) (1999) : 81-92.
- [25] Wubben, T., et al. Stability of metallic foams studied under microgravity. Journal of Physics: Condensed Matter 15 (2003) : 427-433.
- [26] Huko, B., and Faria, L. Material model of metallic cellular solids. Computers & Structures 62(6) (1997) : 1049-1057.
- [27] Gibson, L.J. Mechanical Behavior of Metallic Foams. Annu. Rev. Mater. Sci 30 (2000) : 191-227.
- [28] Bin, W., Deping, H., and Guangji, S. Compressive properties and energy absorption of foamed Al alloy. in Proceeding of the 2nd International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology (2001). Bremen, Germany: MIT-Verlag.
- [29] Rohatgi, P.K., Weiss, D., and Gupta, N. Application of Fly Ash in Synthesizing Low cost MMCs for Automotive and Other Applications. JOM (November 2006) : 71-76.
- [30] Sudarshan, Surappa, M.K. Synthesis of fly ash particle reinforced A356 Al composites and their characterization. Materials Science and Engineering A 480 (2008) : 117-124.
- [31] Daoud, A. Effect of fly ash addition on the structure and compressive properties of 4032-fly ash particle composite foams. Journal of Alloys and Compounds 487 (2009): 618-625.
- [32] เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร. วัสดุผสม 1
- [33] Kurama, H., Topcu, I.B., and Karakurt, C. Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. Journal of materials processing technology 209 (2009): 767-773.
- [34] Matsunaga, T., Kim, J.K., Hardcastle, S., and Rohatgi, P.K. Crystallinity and selected properties of fly ash particles. Materials Science and Engineering A 325 (2002) : 333-343.

- [35] Ozben, T., Kilickap, E., and Cakir, O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. Journal of materials processing technology 198 (2008) : 220-225.
- [36] Deqing, W., and Ziyuan, S. Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminium foam. Materials Science and Engineering A 361 (2003) : 45-49.
- [37] Guo, R.Q., Venugopalan, D., and Rohatgi, P.K. Differential thermal analysis to establish the stability of aluminium-fly ash composites during synthesis and reheating. Materials Science and Engineering A 241 (1998) : 184-190.
- [38] Ghosal, S., Sidney A.S. Particle size-density relation and cenosphere content of coal fly ash. Fuel 74 (1995) : 522-529.
- [39] Rohatgi, P.K., Guo, R.Q., Iksan, H., Borchelt, E.J., and Esthana, R. Pressure infiltration technique for synthesis of aluminium-fly ash particulate composite. Materials Science and Engineering A 244 (1998) : 22-30.
- [40] Gergely, V., and Clyne, T.W. Drainage in standing liquid metal foams: modelling and experimental observations. Acta Materialia 52 (2004) : 3047-3058.
- [41] Rahimian, M., Parvin, N., and Ehsani, N. Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy. Materials Science and Engineering A 527 (2010) : 1031-1038.
- [42] Li, G., Zhao, Y., and Pang, S. Analytical modeling of particle size and cluster effects on particulate-filled composite. Materials Science and Engineering A 271 (1999) : 43-52.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโพรงอากาศ

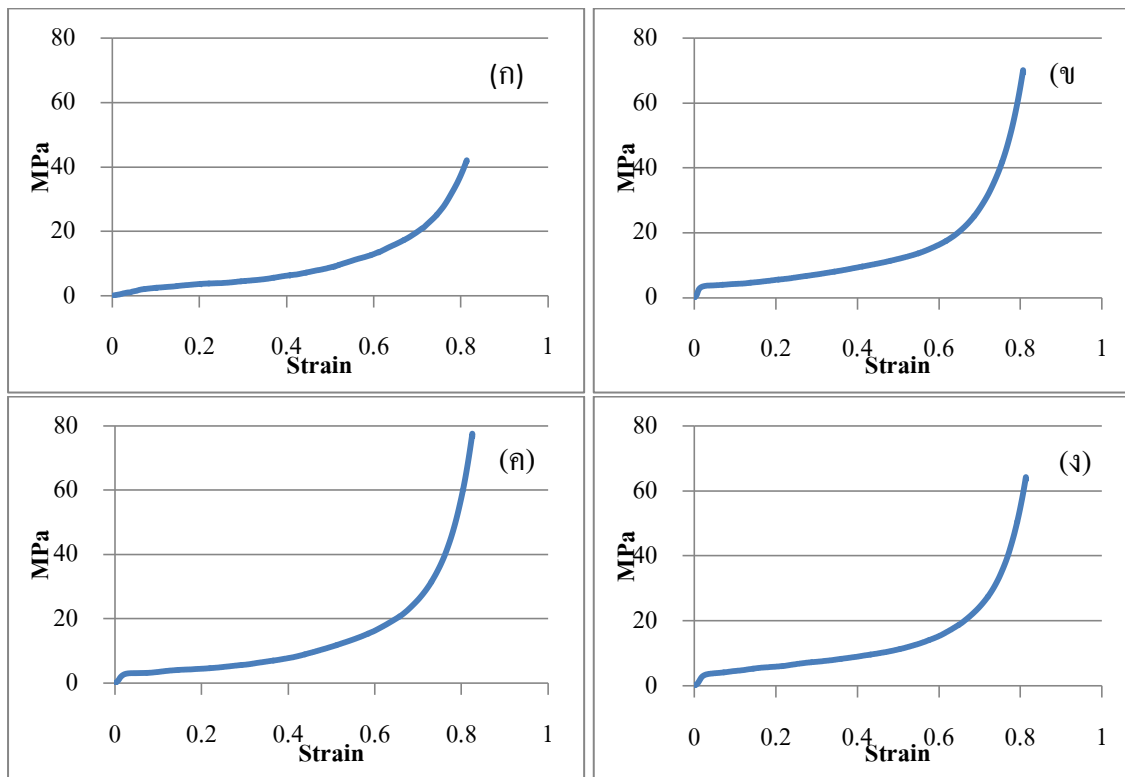
ตารางที่ 1ก แสดงจำนวนโพรงอากาศ ขนาดโพรงอากาศและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Material		จำนวนโพรง อากาศ	ขนาดโพรงอากาศ เฉลี่ย (cm ²)	SD (cm ²)
อะลูมิเนียมบริสุทธิ์		67	0.115	0.118
อะลูมิเนียม + ไขมันเปียก (ϕ 457 μ m)	1 wt. %	107	0.069	0.094
	2 wt. %	112	0.064	0.078
	3 wt. %	92	0.079	0.172
	4 wt. %	58	0.117	0.318
	5 wt. %	49	0.135	0.325
อะลูมิเนียม + ไขมันเปียก (ϕ 186 μ m)	1 wt. %	86	0.089	0.134
	2 wt. %	64	0.103	0.148
	3 wt. %	89	0.066	0.087
	4 wt. %	88	0.059	0.081
	5 wt. %	82	0.051	0.064
อะลูมิเนียม + ไขมันเปียก (ϕ 78 μ m)	1 wt. %	79	0.095	0.188
	2 wt. %	80	0.077	0.1
	3 wt. %	89	0.068	0.089
	4 wt. %	43	0.078	0.074
	5 wt. %	39	0.071	0.095
อะลูมิเนียม+ไขมัน+ซีเมนต์ ชนิด precipitator (ϕ 171 μ m)	1 wt. %	71	0.106	0.136
	2 wt. %	59	0.101	0.151
	3 wt. %	77	0.074	0.077
	4 wt. %	56	0.078	0.113
	5 wt. %	51	0.079	0.077
	1 wt. %	76	0.104	0.17

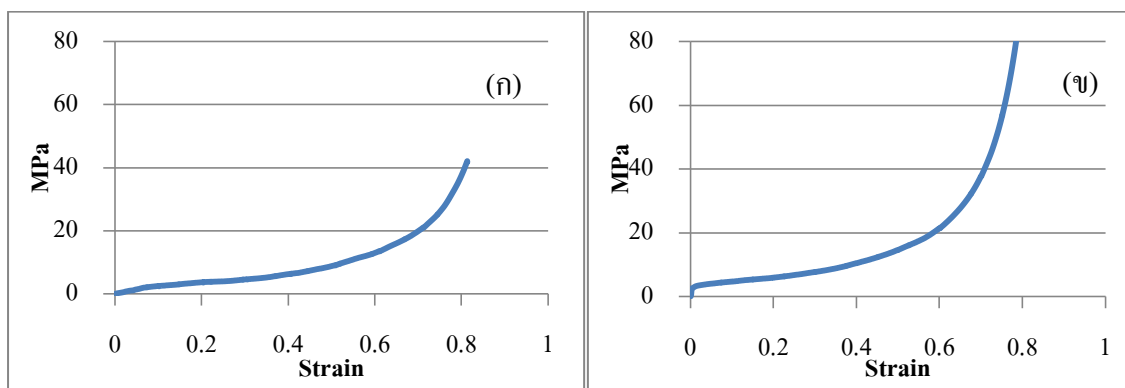
อะลูมิเนียม+ซีเมนต์ ชนิด precipitator (ϕ 51 μ m)	2 wt.%	80	0.09	0.097
	3 wt.%	68	0.109	0.171
	4 wt.%	56	0.119	0.198
	5 wt.%	47	0.122	0.231
อะลูมิเนียม+ซีเมนต์ ชนิด precipitator (ϕ 12 μ m)	1 wt.%	74	0.1	0.118
	2 wt.%	75	0.098	0.187
	3 wt.%	64	0.12	0.113
	4 wt.%	39	0.142	0.223
	5 wt.%	21	0.163	0.328
อะลูมิเนียม+ซีเมนต์ ชนิด cenosphere (ϕ 65 μ m)	1 wt.%	43	0.134	0.193
	2 wt.%	34	0.102	0.133
	3 wt.%	14	0.148	0.286
อะลูมิเนียม+ซีเมนต์ ชนิด cenosphere (ϕ 14 μ m)	1 wt.%	35	0.145	0.284
	-	-	-	-

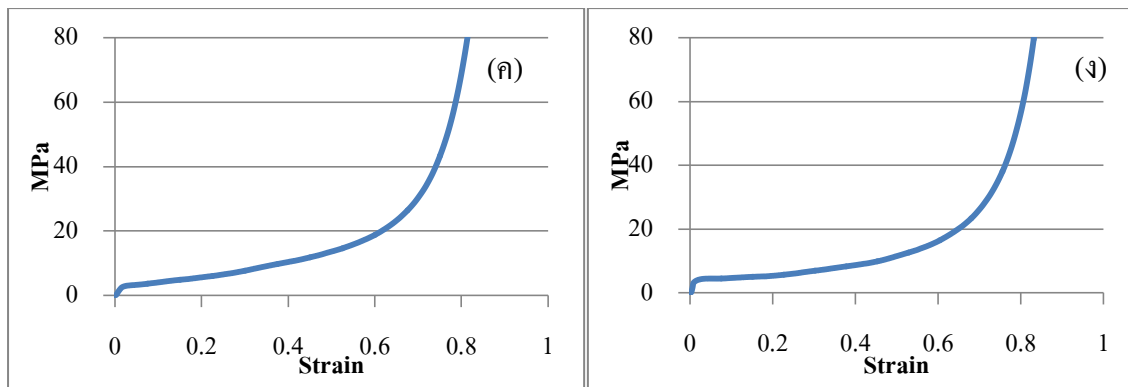
ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

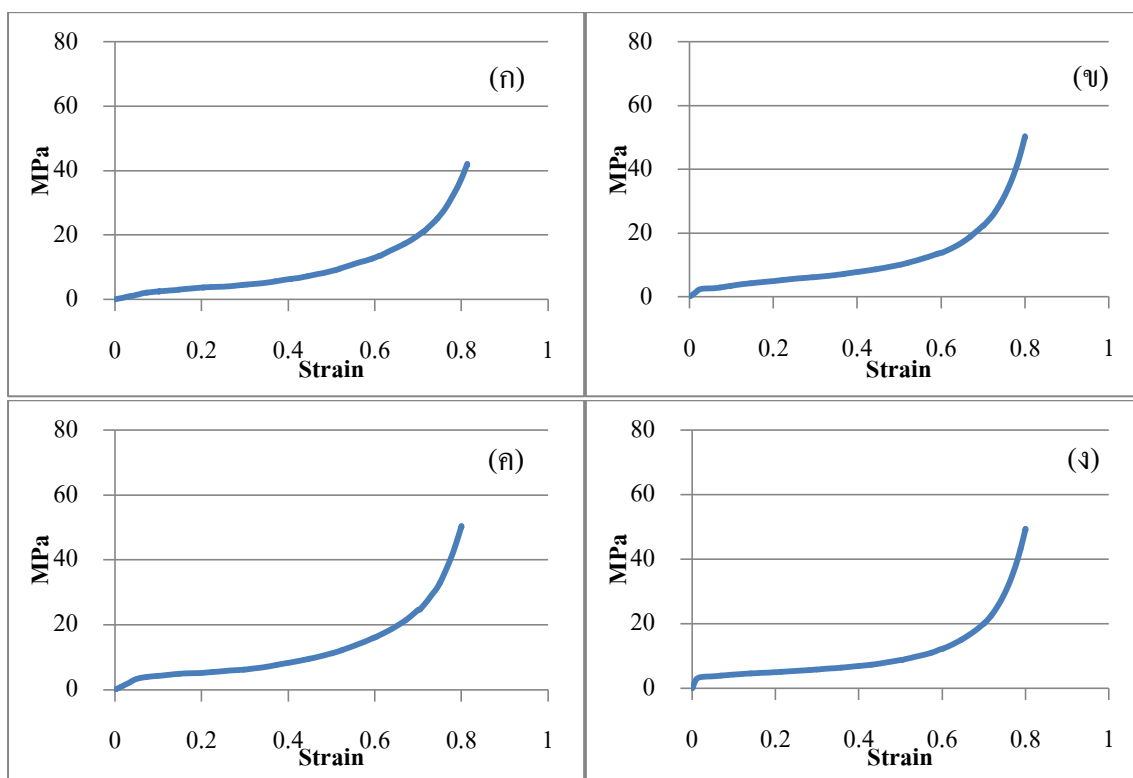


รูปที่ 1 ข กราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เป็ยขนาดเฉลี่ย 78 μm (ก) โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (ข) 1 wt.% (ค) 2 wt.% (ง) 3 wt.%

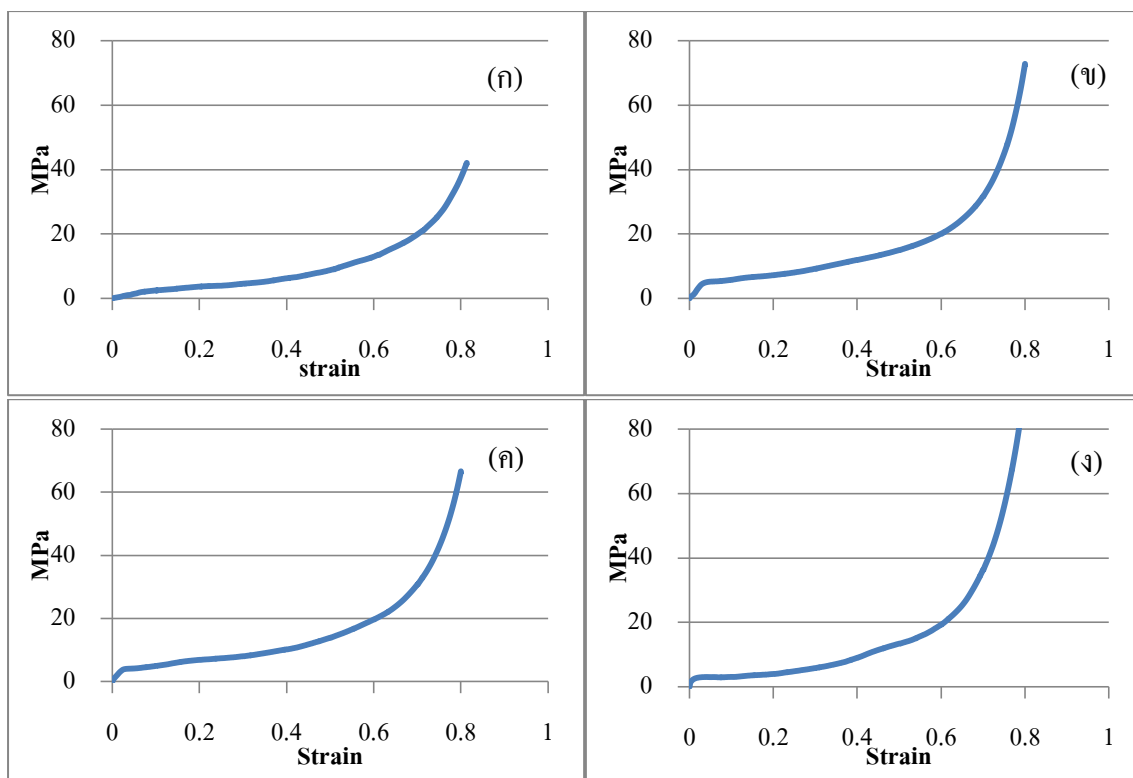




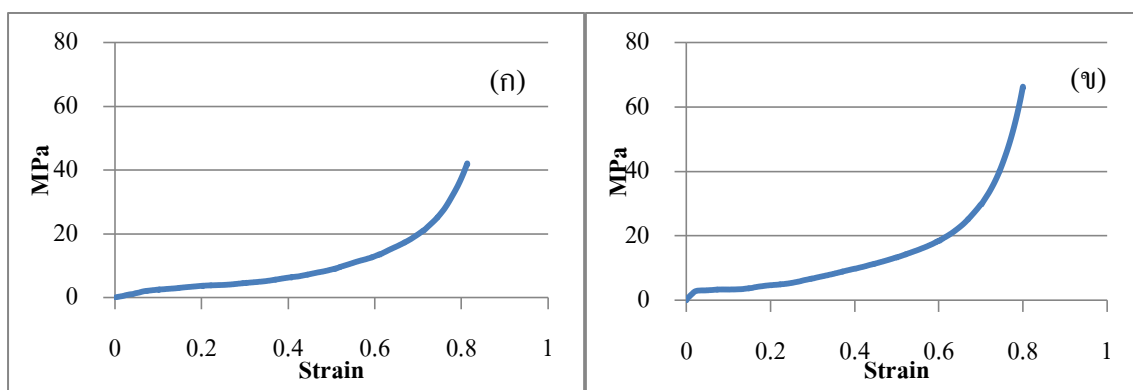
รูปที่ 2 ข กราฟความเค้นความเครียดของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมซีเอ็นทีเส้นขนาด
เฉลี่ย 186 μm (ก) โพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ (ข) 1 wt.% (ค) 2 wt.% (ง) 3 wt.%

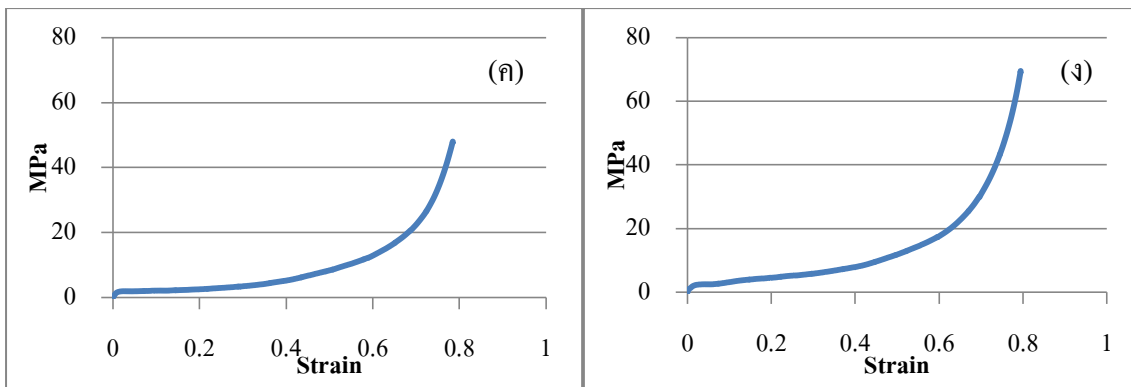


รูปที่ 3 ข กราฟความเค้นความเครียดของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมซีเอ็นทีเส้นขนาด
เฉลี่ย 457 μm (ก) โพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ (ข) 1 wt.% (ค) 2 wt.% (ง) 3 wt.%

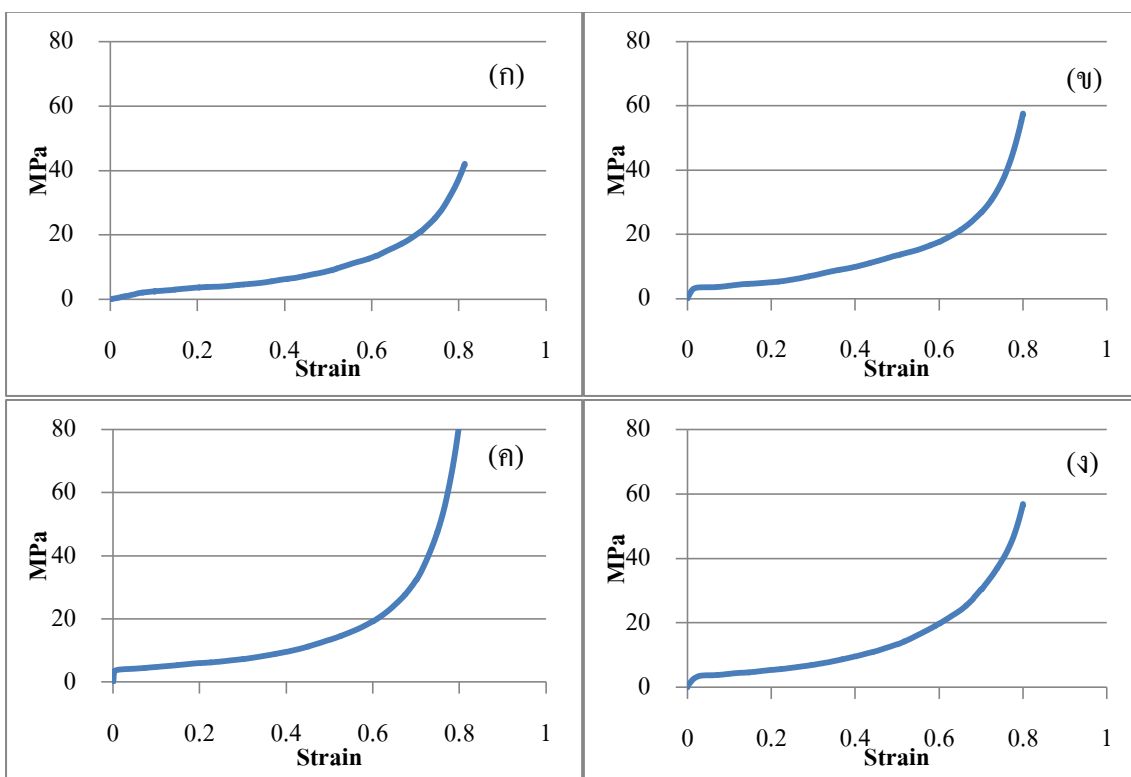


รูปที่ 4ข กราฟความเค้นความเครียดของโพลีอิมิดและโพลีอิมิดผสมซีโต้ลออกไซด์
Precipitator ขนาดเฉลี่ย 12 μm (ก) โพลีอิมิดบริสุทธิ์ (ข) 1 wt.% (ค) 2 wt.% (ง) 3 wt.%





รูปที่ 5 ข กราฟความเค้นความเครียดของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมซีเมนต์อัลลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 51 μm (ก) โพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ (ข) 1 wt.% (ค) 2 wt.% (ง) 3 wt.%



รูปที่ 6 ข กราฟความเค้นความเครียดของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมซีเมนต์อัลลอยชนิด Precipitator ขนาดเฉลี่ย 171 μm (ก) โพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ (ข) 1 wt.% (ค) 2 wt.% (ง) 3 wt.%

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดของอนุภาค



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาปน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2546211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax 2546211

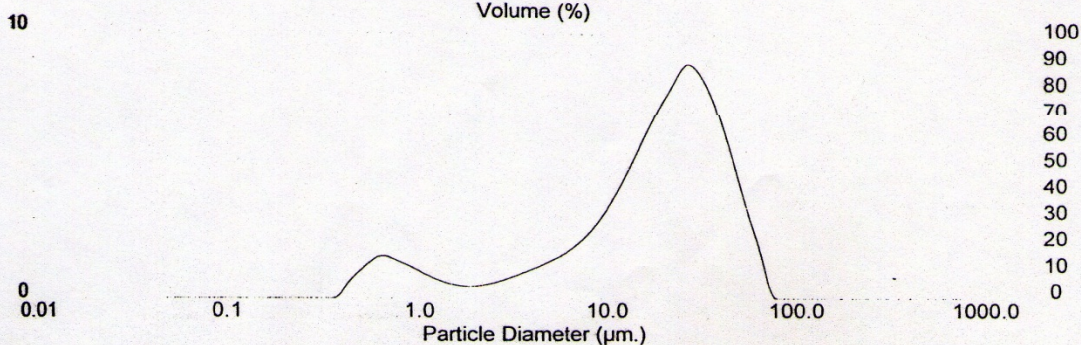
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Bottom ash9	Run Number: 2	Measured: Fri Oct 16 2009 4:00PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 414	Analysed: Fri Oct 16 2009 4:00PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Bottom ash diameter <38 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 15.8 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 1.195 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0156 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 1.0774 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 2.12 um	D (v, 0.5) = 21.84 um	D (v, 0.9) = 46.87 um
D [4, 3] = 23.76 um	D [3, 2] = 5.57 um	Span = 2.049E+00	Uniformity = 6.116E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	1.90	7.72	19.05
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	2.32	9.00	21.37
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	2.88	10.48	24.26
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	3.60	12.21	27.86
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	4.47	14.22	32.33
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	5.42	16.57	37.75
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	6.40	19.31	44.15
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	7.31	22.49	51.46
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	8.12	26.20	59.57
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	8.84	30.53	68.41
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	8.60	35.56	77.01
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	7.74	41.43	84.74
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	6.36	48.27	91.10
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	4.66	56.23	95.76
0.42	0.43	0.49	0.43	56.23	2.97	65.51	98.73
0.49	0.96	0.58	1.39	65.51	1.27	76.32	100.00
0.58	1.37	0.67	2.77	76.32	0.00	88.91	100.00
0.67	1.57	0.78	4.34	88.91	0.00	103.58	100.00
0.78	1.42	0.91	5.76	103.58	0.00	120.67	100.00
0.91	1.21	1.06	6.98	120.67	0.00	140.58	100.00
1.06	0.98	1.24	7.95	140.58	0.00	163.77	100.00
1.24	0.75	1.44	8.70	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.58	1.68	9.28	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.48	1.95	9.76	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.45	2.28	10.22	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.51	2.65	10.72	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.62	3.09	11.34	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.77	3.60	12.12	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.95	4.19	13.07	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	1.14	4.88	14.21	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	1.35	5.69	15.56	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	1.59	6.63	17.15	754.23	0.00	878.67	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2-46211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax: 2549211

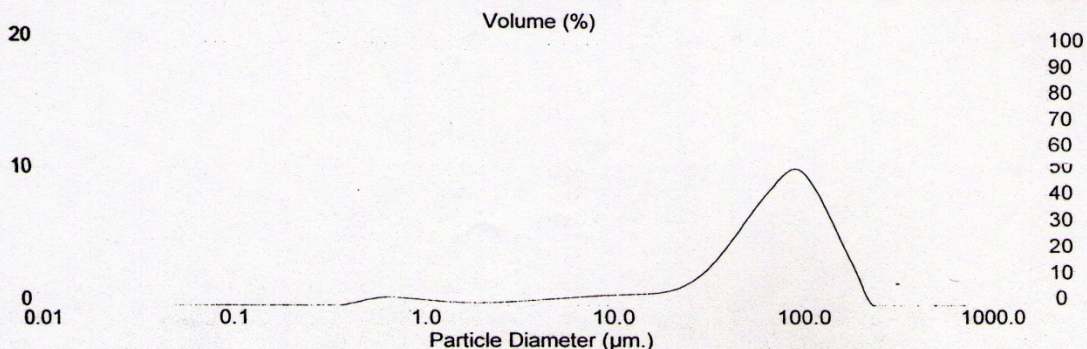
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Bottom ash8	Run Number: 5	Measured: Fri Oct 16 2009 3:38PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 407	Analysed: Fri Oct 16 2009 3:38PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Bottom ash diameter >38 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 14.2 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.078 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0326 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.4544 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 12.10 um	D (v, 0.5) = 74.38 um	D (v, 0.9) = 144.19 um
D [4, 3] = 78.10 um	D [3, 2] = 13.21 um	Span = 1.776E+00	Uniformity = 5.221E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.65	7.72	7.76
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.71	9.00	8.47
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.77	10.48	9.24
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.81	12.21	10.05
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.84	14.22	10.89
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.87	16.57	11.76
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.94	19.31	12.70
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	1.10	22.49	13.80
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	1.41	26.20	15.21
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	1.94	30.53	17.14
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	2.72	35.56	19.86
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	3.77	41.43	23.63
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	5.03	48.27	28.66
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	6.38	56.23	35.04
0.42	0.17	0.49	0.17	56.23	7.68	65.51	42.72
0.49	0.38	0.58	0.55	65.51	8.84	76.32	51.56
0.58	0.55	0.67	1.11	76.32	9.87	88.91	61.43
0.67	0.64	0.78	1.74	88.91	10.26	103.58	71.69
0.78	0.58	0.91	2.33	103.58	9.40	120.67	81.08
0.91	0.51	1.06	2.84	120.67	7.81	140.58	88.89
1.06	0.42	1.24	3.26	140.58	5.78	163.77	94.68
1.24	0.34	1.44	3.59	163.77	3.70	190.80	98.38
1.44	0.28	1.68	3.87	190.80	1.62	222.28	100.00
1.68	0.24	1.95	4.11	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.22	2.28	4.33	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.24	2.65	4.57	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.28	3.09	4.85	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.33	3.60	5.17	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.39	4.19	5.56	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.45	4.88	6.01	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.52	5.69	6.53	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.58	6.63	7.11	754.23	0.00	878.67	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสนาม 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

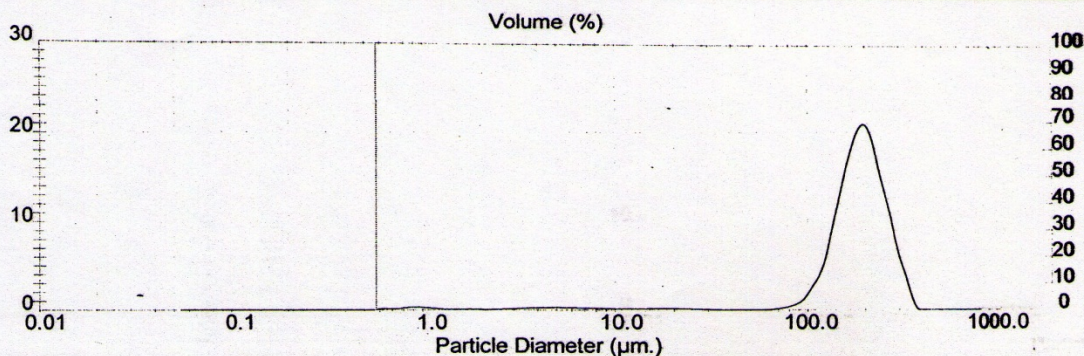
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Bottom ash10	Run Number: 7	Measured: Fri Oct 16 2009 4:17PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 429	Analysed: Fri Oct 16 2009 4:17PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Bottom ash diameter > 38 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 13.5 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); ·	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.764 %
Modifications: Active --	Killed Result Channels: < 0.58 um; > 878.67 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0623 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1704 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 117.60 um	D (v, 0.5) = 188.25 um	D (v, 0.9) = 268.50 um
D [4, 3] = 186.95 um	D [3, 2] = 35.21 um	Span = 8.016E-01	Uniformity = 2.694E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.26	7.72	3.71
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.21	9.00	3.92
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.18	10.48	4.10
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.16	12.21	4.26
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.16	14.22	4.42
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.17	16.57	4.60
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.18	19.31	4.78
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.17	22.49	4.95
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.15	26.20	5.10
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.11	30.53	5.20
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.07	35.56	5.27
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	0.04	41.43	5.31
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	0.01	48.27	5.32
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.02	56.23	5.34
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	0.06	65.51	5.40
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	0.18	76.32	5.57
0.58	0.18	0.67	0.18	76.32	0.49	88.91	6.06
0.67	0.15	0.78	0.33	88.91	1.29	103.58	7.35
0.78	0.33	0.91	0.66	103.58	3.32	120.67	10.68
0.91	0.34	1.06	1.00	120.67	7.70	140.58	18.37
1.06	0.23	1.24	1.24	140.58	14.08	163.77	32.45
1.24	0.13	1.44	1.36	163.77	19.38	190.80	51.83
1.44	0.12	1.68	1.49	190.80	20.39	222.28	72.22
1.68	0.14	1.95	1.63	222.28	15.03	258.95	87.25
1.95	0.10	2.28	1.73	258.95	9.05	301.68	96.30
2.28	0.13	2.65	1.87	301.68	3.70	351.46	100.00
2.65	0.16	3.09	2.03	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.23	3.60	2.26	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.28	4.19	2.53	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.31	4.88	2.84	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.31	5.69	3.16	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.29	6.63	3.45	754.23	0.00	878.67	100.00



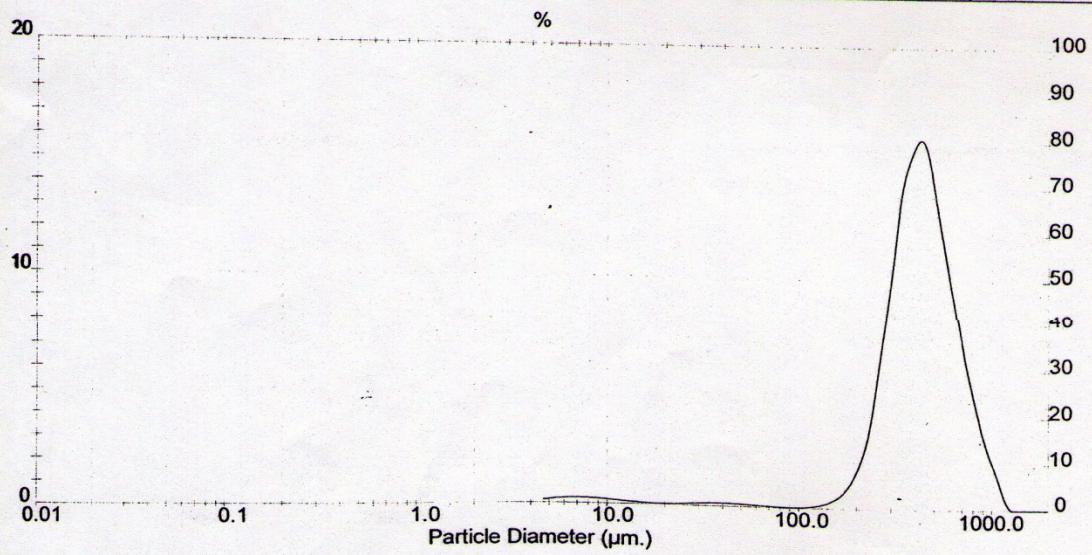
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Bottom ash12	Run Number: 3	Measured: Mon Oct 19 2009 12:13PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 456	Analysed: Mon Oct 19 2009 12:13PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Bottom ash diameter >250 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 13.5 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.528 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.4121 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0284 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 260.50 um	D (v, 0.5) = 426.06 um	D (v, 0.9) = 719.51 um
D [4, 3] = 457.85 um	D [3, 2] = 210.92 um	Span = 1.077E+00	Uniformity = 3.417E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
4.19	0.12	4.88	0.12	120.67	0.14	140.58	2.67
4.88	0.19	5.69	0.31	140.58	0.35	163.77	3.01
5.69	0.23	6.63	0.54	163.77	0.81	190.80	3.82
6.63	0.24	7.72	0.78	190.80	1.84	222.28	5.67
7.72	0.23	9.00	1.02	222.28	4.08	258.95	9.74
9.00	0.20	10.48	1.21	258.95	8.07	301.68	17.81
10.48	0.15	12.21	1.36	301.68	12.63	351.46	30.44
12.21	0.11	14.22	1.47	351.46	15.34	409.45	45.78
14.22	0.07	16.57	1.54	409.45	15.92	477.01	61.70
16.57	0.05	19.31	1.59	477.01	13.17	555.71	74.87
19.31	0.05	22.49	1.63	555.71	9.99	647.41	84.86
22.49	0.07	26.20	1.70	647.41	7.02	754.23	91.88
26.20	0.10	30.53	1.79	754.23	4.54	878.67	96.42
30.53	0.13	35.56	1.92	878.67	2.52	1023.66	98.94
35.56	0.14	41.43	2.06	1023.66	1.06	1192.56	100.00
41.43	0.13	48.27	2.19	1192.56	0.00	1389.33	100.00
48.27	0.11	56.23	2.30	1389.33	0.00	1618.57	100.00
56.23	0.08	65.51	2.38	1618.57	0.00	1885.64	100.00
65.51	0.05	76.32	2.43	1885.64	0.00	2196.77	100.00
76.32	0.03	88.91	2.46	2196.77	0.00	2559.23	100.00
88.91	0.02	103.58	2.48	2559.23	0.00	2981.51	100.00
103.58	0.05	120.67	2.53	2981.51	0.00	3473.45	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารหอเรียน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32 2188101
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101

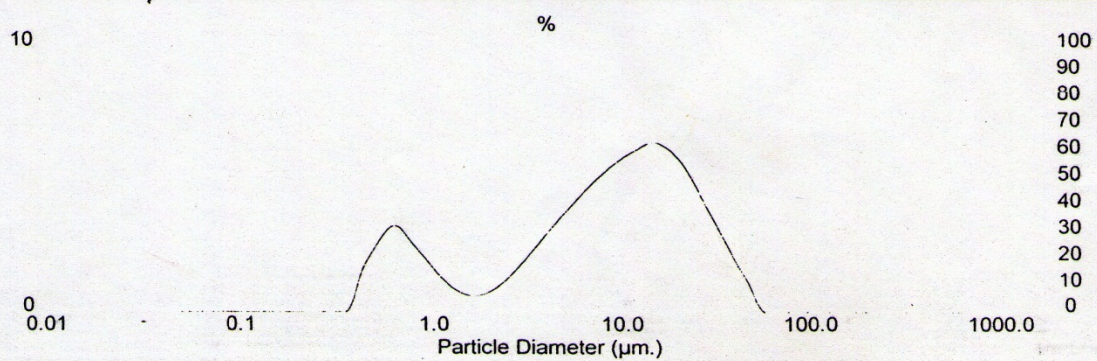
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Fly ash1	Run Number: 3	Measured: Fri Oct 16 2009 11:06AM
Sample File: CHULA12	Record Number: 294	Analysed: Fri Oct 16 2009 11:06AM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Fly ash diameter smaller than 38 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 13.0 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 1.429 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0072 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 1.9865 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 0.80 um	D (v, 0.5) = 9.95 um	D (v, 0.9) = 28.56 um
D [4, 3] = 12.69 um	D [3, 2] = 3.02 um	Span = 2.790E+00	Uniformity = 8.572E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	4.65	7.72	41.29
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	5.11	9.00	46.40
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	5.52	10.48	51.92
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	5.86	12.21	57.78
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	6.14	14.22	63.92
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	6.37	16.57	70.29
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	6.22	19.31	76.51
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	5.82	22.49	82.33
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	5.15	26.20	87.48
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	4.27	30.53	91.75
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	3.39	35.56	95.13
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	2.50	41.43	97.64
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.62	48.27	99.26
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.74	56.23	100.00
0.42	1.15	0.49	1.15	56.23	0.00	65.51	100.00
0.49	2.20	0.58	3.35	65.51	0.00	76.32	100.00
0.58	2.94	0.67	6.29	76.32	0.00	88.91	100.00
0.67	3.22	0.78	9.51	88.91	0.00	103.58	100.00
0.78	2.71	0.91	12.22	103.58	0.00	120.67	100.00
0.91	2.15	1.06	14.37	120.67	0.00	140.58	100.00
1.06	1.56	1.24	15.93	140.58	0.00	163.77	100.00
1.24	1.06	1.44	16.99	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.74	1.68	17.73	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.63	1.95	18.36	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.71	2.28	19.07	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.98	2.65	20.05	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	1.40	3.09	21.45	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	1.91	3.60	23.36	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	2.47	4.19	25.84	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.05	4.88	28.89	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	3.61	5.69	32.49	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	4.14	6.63	36.64	754.23	0.00	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, UK
 Tel: +[44](0)1684-892456 Fax: +[44](0)1684-892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number:

19 Oct 09 08:...



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2-40211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax 2540211

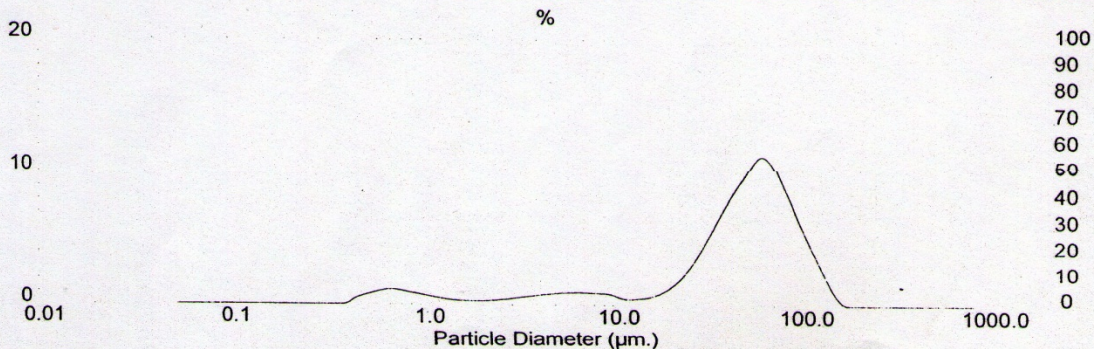
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Fly ash2	Run Number: 3	Measured: Fri Oct 16 2009 1:12PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 319	Analysed: Fri Oct 16 2009 1:12PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Fly ash diameter > 38 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 16.2 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.918 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0240 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.7448 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 4.66 um	D (v, 0.5) = 50.63 um	D (v, 0.9) = 94.61 um
D [4, 3] = 51.80 um	D [3, 2] = 8.06 um	Span = 1.776E+00	Uniformity = 5.081E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.96	7.72	13.11
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.91	9.00	14.03
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.83	10.48	14.86
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.49	12.21	15.35
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.48	14.22	15.83
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.60	16.57	16.43
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.92	19.31	17.34
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	1.53	22.49	18.88
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	2.52	26.20	21.40
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	3.88	30.53	25.28
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	5.53	35.56	30.81
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	7.27	41.43	38.09
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	8.87	48.27	46.95
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	10.18	56.23	57.13
0.42	0.41	0.49	0.41	56.23	11.27	65.51	68.40
0.49	0.78	0.58	1.19	65.51	10.31	76.32	78.72
0.58	1.05	0.67	2.24	76.32	8.49	88.91	87.20
0.67	1.16	0.78	3.40	88.91	6.21	103.58	93.41
0.78	1.00	0.91	4.40	103.58	4.06	120.67	97.48
0.91	0.82	1.06	5.21	120.67	2.10	140.58	99.57
1.06	0.62	1.24	5.84	140.58	0.43	163.77	100.00
1.24	0.46	1.44	6.30	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.35	1.68	6.65	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.31	1.95	6.96	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.31	2.28	7.27	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.37	2.65	7.65	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.47	3.09	8.12	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.59	3.60	8.71	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.72	4.19	9.43	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.83	4.88	10.27	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.92	5.69	11.19	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.96	6.63	12.15	754.23	0.00	878.67	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax 2548211

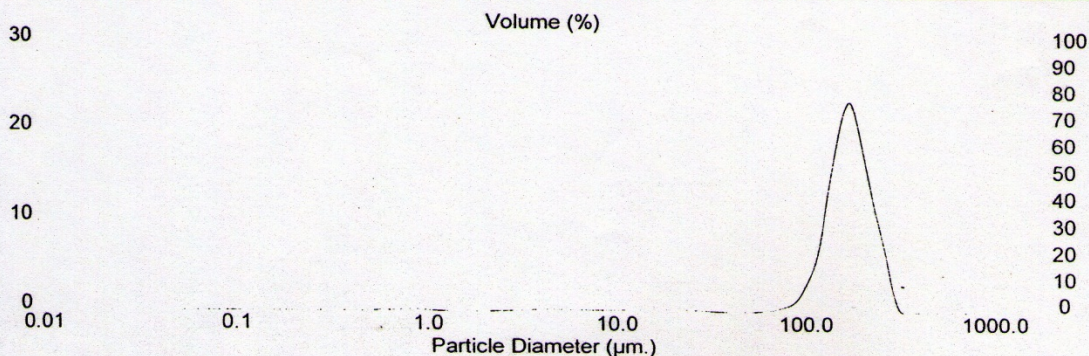
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Fly ash3	Run Number: 14	Measured: Fri Oct 16 2009 1:38PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 340	Analysed: Fri Oct 16 2009 1:38PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Fly ash diameter > 125 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 17.5 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.876 %
Modifications: Active --	Killed Result Channels: < 0.58 um; > 878.67 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0942 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1323 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 113.02 um	D (v, 0.5) = 172.68 um	D (v, 0.9) = 239.92 um
D [4, 3] = 171.16 um	D [3, 2] = 45.34 um	Span = 7.349E-01	Uniformity = 2.422E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.23	7.72	2.55
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.21	9.00	2.76
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.21	10.48	2.97
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.23	12.21	3.20
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.26	14.22	3.46
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.30	16.57	3.75
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.31	19.31	4.07
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.30	22.49	4.37
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.26	26.20	4.63
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.19	30.53	4.83
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.12	35.56	4.95
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	0.07	41.43	5.01
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	0.02	48.27	5.03
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.04	56.23	5.06
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	0.11	65.51	5.17
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	0.27	76.32	5.44
0.58	0.16	0.67	0.16	76.32	0.66	88.91	6.09
0.67	0.14	0.78	0.30	88.91	1.67	103.58	7.77
0.78	0.23	0.91	0.53	103.58	4.41	120.67	12.18
0.91	0.23	1.06	0.76	120.67	10.70	140.58	22.88
1.06	0.13	1.24	0.89	140.58	19.02	163.77	41.90
1.24	0.06	1.44	0.95	163.77	23.42	190.80	65.31
1.44	0.00	1.68	0.95	190.80	18.25	222.28	83.57
1.68	0.00	1.95	0.95	222.28	11.31	258.95	94.87
1.95	0.00	2.28	0.95	258.95	5.03	301.68	99.91
2.28	0.08	2.65	1.03	301.68	0.09	351.46	100.00
2.65	0.12	3.09	1.15	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.18	3.60	1.33	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.22	4.19	1.55	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.26	4.88	1.81	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.26	5.69	2.07	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.25	6.63	2.32	754.23	0.00	878.67	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานีน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax 2544234

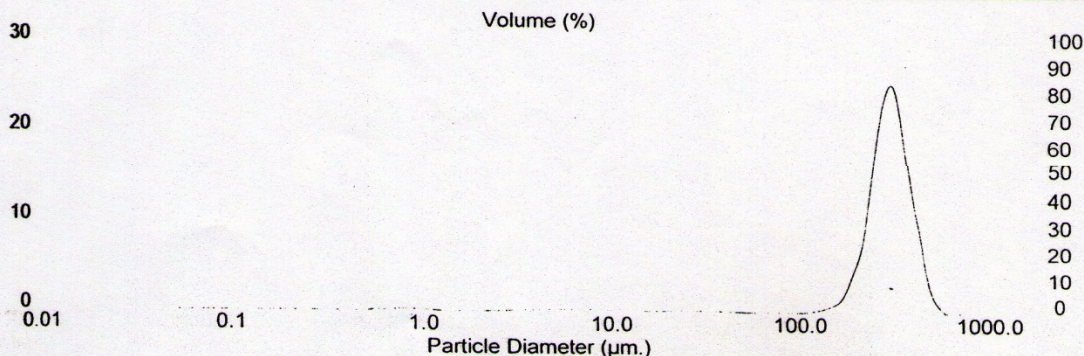
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Fly ash4	Run Number: 11	Measured: Fri Oct 16 2009 1:53PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 357	Analysed: Fri Oct 16 2009 1:53PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Fly ash diameter > 250 um medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 16.1 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.659 %
Modifications: Active --	Killed Result Channels: < 0.58 um; > 878.67 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1012 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1223 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 201.61 um	D (v, 0.5) = 301.00 um	D (v, 0.9) = 406.52 um
D [4, 3] = 295.83 um	D [3, 2] = 49.07 um	Span = 6.808E-01	Uniformity = 2.337E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.29	7.72	2.69
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.29	9.00	2.98
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.27	10.48	3.25
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.23	12.21	3.48
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.19	14.22	3.68
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.16	16.57	3.84
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.16	19.31	3.99
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.17	22.49	4.17
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.20	26.20	4.36
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.21	30.53	4.58
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.21	35.56	4.78
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	0.18	41.43	4.96
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	0.14	48.27	5.09
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.09	56.23	5.18
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	0.05	65.51	5.23
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	0.01	76.32	5.24
0.58	0.16	0.67	0.16	76.32	0.01	88.91	5.25
0.67	0.14	0.78	0.31	88.91	0.04	103.58	5.29
0.78	0.24	0.91	0.55	103.58	0.11	120.67	5.39
0.91	0.24	1.06	0.79	120.67	0.29	140.58	5.68
1.06	0.15	1.24	0.94	140.58	0.74	163.77	6.42
1.24	0.08	1.44	1.02	163.77	1.99	190.80	8.41
1.44	0.00	1.68	1.02	190.80	5.41	222.28	13.82
1.68	0.00	1.95	1.02	222.28	13.37	258.95	27.19
1.95	0.00	2.28	1.02	258.95	23.19	301.68	50.38
2.28	0.09	2.65	1.11	301.68	24.77	351.46	75.15
2.65	0.12	3.09	1.23	351.46	15.42	409.45	90.57
3.09	0.17	3.60	1.40	409.45	7.90	477.01	98.47
3.60	0.21	4.19	1.61	477.01	1.53	555.71	100.00
4.19	0.25	4.88	1.85	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.27	5.69	2.12	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.28	6.63	2.40	754.23	0.00	878.67	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax 2540211

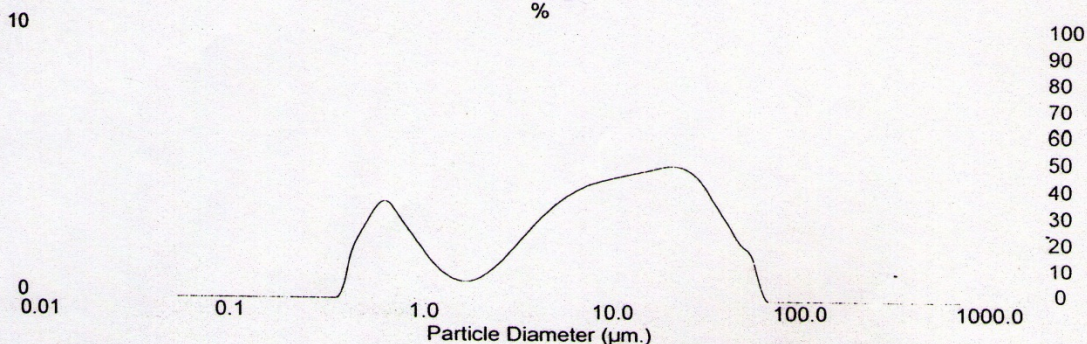
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Fly ash5	Run Number: 5	Measured: Fri Oct 16 2009 2:12PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 371	Analysed: Fri Oct 16 2009 2:12PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Fly ash diameter < 38 um float medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 21.0 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.619 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0114 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 2.1518 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 0.75 um	D (v, 0.5) = 9.81 um	D (v, 0.9) = 35.38 um
D [4, 3] = 14.44 um	D [3, 2] = 2.79 um	Span = 3.530E+00	Uniformity = 1.086E+00

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	4.15	7.72	43.12
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	4.35	9.00	47.47
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	4.49	10.48	51.96
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	4.61	12.21	56.57
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	4.70	14.22	61.27
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	4.80	16.57	66.08
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	4.91	19.31	70.99
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	5.01	22.49	76.00
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	5.01	26.20	81.01
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	4.80	30.53	85.81
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	4.33	35.56	90.14
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	3.58	41.43	93.72
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	2.84	48.27	96.56
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	2.09	56.23	98.65
0.42	1.37	0.49	1.37	56.23	1.35	65.51	100.00
0.49	2.53	0.58	3.90	65.51	0.00	76.32	100.00
0.58	3.34	0.67	7.24	76.32	0.00	88.91	100.00
0.67	3.63	0.78	10.87	88.91	0.00	103.58	100.00
0.78	3.04	0.91	13.91	103.58	0.00	120.67	100.00
0.91	2.38	1.06	16.30	120.67	0.00	140.58	100.00
1.06	1.72	1.24	18.02	140.58	0.00	163.77	100.00
1.24	1.16	1.44	19.18	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.81	1.68	19.99	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.68	1.95	20.68	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.77	2.28	21.44	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	1.05	2.65	22.50	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	1.48	3.09	23.98	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	2.00	3.60	25.98	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	2.54	4.19	28.53	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.06	4.88	31.59	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	3.51	5.69	35.10	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	3.87	6.63	38.97	754.23	0.00	878.67	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

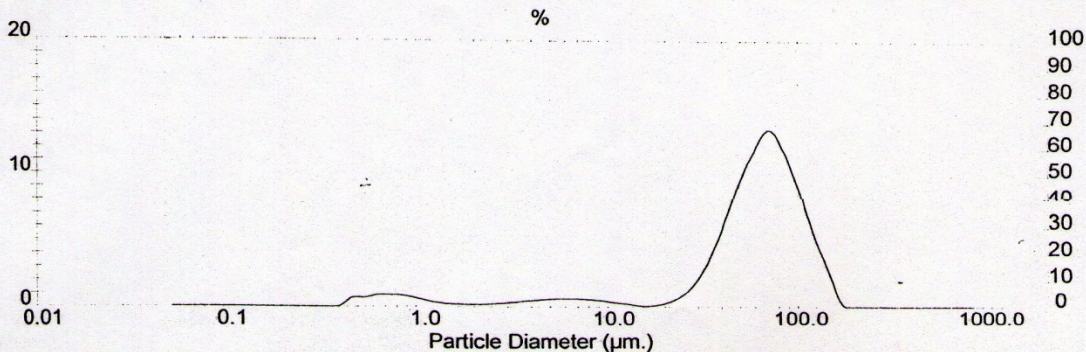
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Fly ash6	Run Number: 4	Measured: Fri Oct 16 2009 2:24PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 380	Analysed: Fri Oct 16 2009 2:24PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Fly ash diameter > 38 um float medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 13.2 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersion R.I. = 1.3300]	Residual: 0.913 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0247 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.6130 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 9.10 um	D (v, 0.5) = 64.29 um	D (v, 0.9) = 110.00 um
D [4, 3] = 65.04 um	D [3, 2] = 9.79 um	Span = 1.569E+00	Uniformity = 4.208E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.59	7.72	9.44
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.52	9.00	9.96
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.42	10.48	10.38
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.30	12.21	10.68
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.19	14.22	10.87
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.07	16.57	10.95
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.13	19.31	11.08
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.33	22.49	11.41
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.78	26.20	12.19
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	1.61	30.53	13.79
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	3.00	35.56	16.79
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	5.06	41.43	21.85
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	7.61	48.27	29.45
0.36	0.02	0.42	0.02	48.27	10.09	56.23	39.54
0.42	0.61	0.49	0.63	56.23	12.03	65.51	51.58
0.49	0.68	0.58	1.31	65.51	13.37	76.32	64.95
0.58	0.86	0.67	2.17	76.32	12.14	88.91	77.09
0.67	0.87	0.78	3.04	88.91	9.82	103.58	86.91
0.78	0.83	0.91	3.87	103.58	6.98	120.67	93.89
0.91	0.65	1.06	4.53	120.67	4.27	140.58	98.17
1.06	0.43	1.24	4.96	140.58	1.83	163.77	100.00
1.24	0.27	1.44	5.22	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.21	1.68	5.43	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.19	1.95	5.61	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.17	2.28	5.79	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.22	2.65	6.01	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.28	3.09	6.29	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.38	3.60	6.67	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.46	4.19	7.13	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.54	4.88	7.66	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.59	5.69	8.25	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.61	6.63	8.85	754.23	0.00	878.67	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2-46211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax 2546211

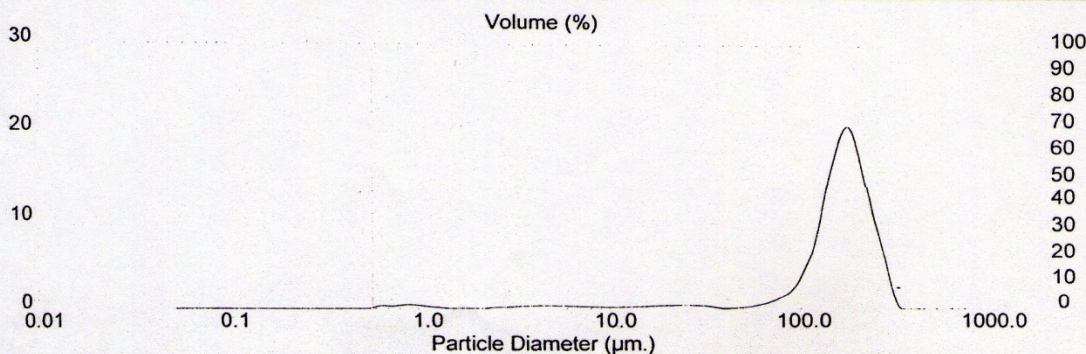
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Fly ash7	Run Number: 5	Measured: Fri Oct 16 2009 2:34PM
Sample File: CHULA12	Record Number: 391	Analysed: Fri Oct 16 2009 2:34PM
Sample Path: D:\DATA1\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Fly ash diameter > 125um float medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 12.7 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); Dispersant R.I. = 1.3300]		Residual: 0.769 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: Active --	Killed Result Channels: < 0.58 um; > 878.67 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0472 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.2065 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 88.10 um	D (v, 0.5) = 165.66 um	D (v, 0.9) = 235.67 um
D [4, 3] = 161.47 um	D [3, 2] = 29.05 um	Span = 8.909E-01	Uniformity = 2.836E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.26	7.72	4.01
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.22	9.00	4.23
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.19	10.48	4.43
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.19	12.21	4.62
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.22	14.22	4.84
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.27	16.57	5.12
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.33	19.31	5.45
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.39	22.49	5.84
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.41	26.20	6.25
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.38	30.53	6.63
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.31	35.56	6.94
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	0.10	41.43	7.04
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	0.10	48.27	7.14
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.20	56.23	7.34
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	0.44	65.51	7.77
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	0.83	76.32	8.60
0.58	0.32	0.67	0.32	76.32	1.51	88.91	10.11
0.67	0.29	0.78	0.61	88.91	2.90	103.58	13.01
0.78	0.45	0.91	1.06	103.58	5.92	120.67	18.93
0.91	0.41	1.06	1.47	120.67	11.61	140.58	30.54
1.06	0.23	1.24	1.70	140.58	17.91	163.77	48.44
1.24	0.12	1.44	1.82	163.77	20.88	190.80	69.33
1.44	0.00	1.68	1.82	190.80	16.19	222.28	85.52
1.68	0.00	1.95	1.82	222.28	10.01	258.95	95.52
1.95	0.00	2.28	1.82	258.95	4.42	301.68	99.95
2.28	0.15	2.65	1.97	301.68	0.05	351.46	100.00
2.65	0.19	3.09	2.15	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.27	3.60	2.43	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.32	4.19	2.75	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.35	4.88	3.10	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.34	5.69	3.44	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.31	6.63	3.75	754.23	0.00	878.67	100.00



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นายอัคร์ชนดล ประภาจรัสวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	วันจันทร์ที่ 7 มีนาคม พ.ศ.2531
ที่อยู่	11 ถนนสมเด็จพระเจ้าตากสิน ซอย 2 บางยี่เรือ ธนบุรี กทม. 10600
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมต้น โรงเรียนสารสาสน์วิเทศน์ศึกษา ปี พ.ศ. 2546 ระดับมัธยมปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา ปี พ.ศ. 2549 ระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2553
โทรศัพท์	081-4908188