

การผลิตโคมอะลูมิเนียมที่ทำให้เสถียรด้วยจีเอ็มแอลบ



นาย รัฐ ตันตศิริไพบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF ALUMINIUM FOAM STABILIZED BY RICE HUSK ASH



Mr. Rath Tantisiriphaiboon

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

รัฐ คันดิสริ โปบูลย์ : การผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ทำให้เสถียรด้วยซีเถ้าแกลบ.

(PRODUCTION OF ALUMINIUM FOAM STABILIZED BY RICE HUSK ASH)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 138 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณซีเถ้าแกลบที่เติมในโฟมอะลูมิเนียมต่อพฤติกรรมการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม รวมทั้งพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม มีการแบ่งซีเถ้าแกลบออกเป็นสี่ขนาดและมีปริมาณซีเถ้าแกลบแปรผันอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 wt.% โดยผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง ที่อุณหภูมิ 800°C และใช้ซีเถ้าแกลบที่ผลิตจากแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยกรด HCl หรือกรด H₂SO₄ เตาที่อุณหภูมิ 700°C นาน 3 h ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min การทดสอบการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียมใช้ชิ้นงานที่มีความสูง 30 mm และมีอัตราความเร็วหัวกด 5 mm/min

จากผลการวิจัยพบว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าแกลบทุกขนาดมีการขยายตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และเมื่อซีเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคเล็กลงโฟมจะขยายตัวได้น้อยลง โฟมที่เติมซีเถ้าแกลบทุกขนาดจะมีการขยายตัวลดลงเมื่อปริมาณของซีเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น แต่โฟมที่ผสมซีเถ้าแกลบทุกส่วนผสมมีโครงสร้างที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ นอกจากนี้การเติมอนุภาคซีเถ้าแกลบทุกส่วนผสมทำให้ผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border ภายในโครงสร้างโฟมมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ สำหรับการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม โฟมที่ผสมซีเถ้าแกลบทุกขนาดมีความแข็งแรงและการดูดซับพลังงานมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมจะมีความแข็งแรงและการดูดซับพลังงานมากขึ้นเมื่อขนาดของซีเถ้าแกลบเล็กลงและมีปริมาณของซีเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....
ปีการศึกษา.....2551.....

ลายมือชื่อนิสิต.....รัฐ คันดิสริ โปบูลย์.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ศูนย์วิทยทรัพยากร

4870436321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: ALUMINIUM FOAM / RICE HUSK ASH / POWDER METALLURGY

RATH TANTISIRIPHAIBOON : PRODUCTION OF ALUMINIUM FOAM STABILIZED BY
RICE HUSK ASH. ADVISOR : SEKSAK ASAVA VISITHCHAI, Ph.D., 138 pp.

The objective of this work is to study the effects of rice husk ash (RHA) on the expansion, structure and mechanical properties of Al foams. The RHA was separated to four different sizes. Its contents added in Al foams were varied in the range of 1 – 3 wt.%. Al foams were produced through a powder metallurgical route at 800°C. The RHA was produced by the chemical treatment using HCl or H₂SO₄, followed by the heat in a furnace at 700°C for 3 h, using a heating rate of 5°C/min. The sectioned foam samples with the length of 30 mm were compressed at the cross head speed of 5 mm/min to 60% strain.

It is found that the addition of RHA, in all cases, resulted in a decrease in the foam expansion, compared with the pure Al foam. The expansion decreases more when RHA with smaller size was added. The expansion also decreases when more amounts of RHA were added. However, better uniform foam structure was obtained when RHA, in all cases, was added. The addition of RHA resulted in an increase in the cell wall thickness. The compressive strength and energy absorption of Al foams increase when RHA has smaller size and more amounts of RHA were added.

Department : Metallurgical Engineering.

Student's signature.....

Field of Study : Metallurgical Engineering...

Advisor's signature.....

Academic Year : 2008.....

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ของหลายๆฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย สำหรับการอุทิศตนและ สละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ ที่เอาใจใส่ทั้งด้าน การเขียนและการทำงานตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงาน วิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว คำนชัยวิจิตร และอาจารย์ ดร. ธนยศ เหลืองวงษ์พันธ์ ที่ให้คำแนะนำ คำแนะนํ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อ งานวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ การสนับสนุนผู้จัดทำในทุกด้านด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรม โลหการทุกท่านสำหรับการสร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความ อนุเคราะห์ในการ ใช้เครื่องมือเตรียมชิ้นงาน ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดมาขอ เสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคน ในครอบครัวต้นติติสิริ ไพบูลย์ โดยเฉพาะบิดาของข้าพเจ้า นายวรุณี ตันติติสิริ ไพบูลย์ ผู้ซึ่งเป็นหัวหน้าครอบครัวที่ทำงานอย่าง หนักมาตลอดชีวิตเพื่อความสบายของสมาชิกครอบครัวทุกคน รวมทั้งมารดาผู้ให้กำลังใจ แต่ผู้จัดทำ เมาใจเคยสอ นอกทานนั้นผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนมาตั้งแต่ อดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลอันเป็นที่รักที่คอยให้กำลังใจในการสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย..... | 2 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 โฟมโลหะ..... | 4 |
| 2.1.1 ลักษณะรูปร่างของโพรงอากาศในโฟมโลหะ..... | 4 |
| 2.1.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ..... | 5 |
| 2.1.3 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ..... | 5 |
| 2.1.4 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ..... | 5 |
| 2.1.5 การนำไปใช้งานสำหรับโฟมโลหะ..... | 6 |
| 2.2 โฟมอะลูมิเนียม..... | 7 |
| 2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม..... | 8 |
| 2.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง..... | 8 |
| 2.5 กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีโลหะผง..... | 10 |
| 2.6 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง..... | 11 |
| 2.6.1 ความหนาแน่นของ Precursor..... | 11 |
| 2.6.2 ลักษณะและปริมาณของ TiH_2 | 12 |
| 2.6.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม..... | 12 |
| 2.6.4 อัตราการให้ความร้อน..... | 13 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.5 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม..... | 14 |
| 2.6.6 ธาตุผสม..... | 16 |
| 2.7 การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม..... | 17 |
| 2.8 สมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียม..... | 20 |
| 2.8.1 ความสามารถในการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม..... | 21 |
| 2.8.2 การดูดซับพลังงานของ โฟมอะลูมิเนียม..... | 23 |
| 2.9 แกลบข้าว..... | 25 |
| 2.9.1 ส่วนประกอบของแกลบข้าว..... | 25 |
| 2.9.2 ซิลิกาในแกลบข้าว..... | 25 |
| 2.9.2.1 ซิลิกาผลึก..... | 25 |
| 2.9.2.2 ซิลิกาอสัณฐาน..... | 26 |
| 2.9.3 ประโยชน์ของซิลิกา..... | 27 |
| 2.9.4 การสะสมของซิลิกาในพืช..... | 27 |
| 2.9.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตซี้แ่้าแกลบ..... | 27 |
| 2.9.6 การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว..... | 29 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 31 |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย..... | 31 |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... | 31 |
| 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 32 |
| 3.3.1 การเตรียมและการตรวจสอบคุณลักษณะของซี้แ่้าแกลบจากแกลบข้าว..... | 32 |
| 3.3.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของซี้แ่้าแกลบ..... | 33 |
| 3.3.3 การผลิต Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม..... | 33 |
| 3.3.4 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม..... | 35 |
| 3.3.5 การทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม..... | 36 |
| 3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม..... | 37 |
| 3.3.7 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของ โฟมอะลูมิเนียม..... | 37 |
| 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล..... | 38 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 39 |
| 4.1 คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุผง..... | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2 คุณลักษณะของซี้เถ้าแกลบ..... | 42 |
| 4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซี้เถ้าแกลบ..... | 42 |
| 4.2.2 การหาส่วนประกอบทางเคมีของซี้เถ้าแกลบ..... | 44 |
| 4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดของผงโลหะ..... | 45 |
| 4.4 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม..... | 46 |
| 4.5 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม..... | 57 |
| 4.6 โครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม..... | 62 |
| 4.6.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังอัด..... | 62 |
| 4.6.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผนังโพรงอากาศ..... | 64 |
| 4.6.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Plateau border..... | 66 |
| 4.6.4 พื้นผิวผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม..... | 68 |
| 4.7 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม..... | 71 |
| บทที่ 5 วิจัยผลการทดลอง..... | 76 |
| 5.1 การขยายตัวของโฟม..... | 76 |
| 5.1.1 ผลของปริมาณอนุภาคต่อการขยายตัวของโฟม..... | 76 |
| 5.1.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อการขยายตัวของโฟม..... | 77 |
| 5.1.3 ผลของประเภทของอนุภาคต่อการขยายตัวของโฟม..... | 78 |
| 5.2 โครงสร้างของโฟม..... | 79 |
| 5.2.1 ผลของปริมาณของอนุภาคต่อโครงสร้างโฟม..... | 79 |
| 5.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อโครงสร้างโฟม..... | 80 |
| 5.2.3 ผลของประเภทของอนุภาคต่อโครงสร้างโฟม..... | 81 |
| 5.3 คุณสมบัติทางกลของโฟม..... | 81 |
| 5.3.1 ผลของปริมาณอนุภาคต่อสมบัติทางกลของโฟม..... | 81 |
| 5.3.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อสมบัติทางกลของโฟม..... | 84 |
| 5.3.3 ผลของประเภทอนุภาคต่อสมบัติทางกลของโฟม..... | 85 |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 87 |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง..... | 87 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ..... | 88 |
| รายการอ้างอิง..... | 89 |

ญ

หน้า

| | |
|---------------------------------|-----|
| ภาคผนวก..... | 92 |
| ภาคผนวก ก..... | 93 |
| ภาคผนวก ข..... | 101 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 138 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ญ

หน้า

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ การนำไปใช้งานและรูปแบบของ ผลิตภัณฑ์โฟมโลหะ..... | 6 |
| ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของแกลบ..... | 25 |
| ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าแกลบที่ได้จากแกลบที่ผ่าน การสกัดด้วยกรด HCl..... | 26 |
| ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุผง..... | 42 |
| ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบเคมีของขี้เถ้าแกลบ..... | 44 |
| ตารางที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม..... | 59 |
| ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดของโพรงอากาศภายในโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม..... | 61 |
| ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม..... | 75 |
| ตารางที่ 1ก แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโฟมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมต่างๆ..... | 95 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ฉ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 โพรงอากาศแบบปิดและโพรงอากาศแบบเปิด..... | 4 |
| รูปที่ 2.2 แผ่นแซนวิชที่บริเวณเนื้อโลหะส่วนกลางทำจากโฟมอะลูมิเนียม..... | 7 |
| รูปที่ 2.3 ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยโฟมที่ใช้เป็นส่วนประกอบรถยนต์..... | 7 |
| รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการผลิต โฟมอะลูมิเนียมจากสถานะของเหลวและสถานะของแข็ง..... | 8 |
| รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง..... | 9 |
| รูปที่ 2.6 การขยายตัวและ โครงสร้างของ โฟมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ..... | 10 |
| รูปที่ 2.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ที่ความหนาแน่นของ Precursor ต่างๆ..... | 11 |
| รูปที่ 2.8 การขยายตัวของอะลูมิเนียม 6061 ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆกันที่อุณหภูมิเตา 800°C..... | 13 |
| รูปที่ 2.9 ผลของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิต โฟมอะลูมิเนียมที่มีต่อการขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียมภายใต้ภาวะการให้ความร้อนเดียวกัน..... | 14 |
| รูปที่ 2.10 ผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม..... | 15 |
| รูปที่ 2.11 ผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงดึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม..... | 15 |
| รูปที่ 2.12 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม..... | 16 |
| รูปที่ 2.13 บริเวณ Plateau border..... | 17 |
| รูปที่ 2.14 แสดงผลของอนุภาคของแข็งต่อการลดลงของ Capillary pressure ระหว่าง บริเวณ Plateau border และ Film..... | 18 |
| รูปที่ 2.15 แสดงผลของความสามารถในการเปียกของอนุภาคของแข็งในน้ำโลหะเหลว..... | 18 |
| รูปที่ 2.16 ผลของขนาดและปริมาณของซิลิกา (SiO ₂) ที่เติมเข้าไปต่อความเสถียร ของโมเดลน้ำ..... | 19 |
| รูปที่ 2.17 Stress-Strain curve ของโฟมโลหะในอุดมคติ และจากการทดสอบจริง..... | 21 |
| รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบค่า Young's modulus และค่าความเค้นแรงอัดความแตกต่างระหว่าง โฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสม AlSi7Mg0.45..... | 21 |
| รูปที่ 2.19 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณรูพรุน ของโฟม..... | |
| (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับความเครียดของ โลหะผสม AlSi7Mg0.45 | 23 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของ โม่ต่างชนิดกัน..... | 24 |
| รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโม่กับความสามารถ ในการดูดซับพลังงานของโม่อะลูมิเนียม..... | 24 |
| รูปที่ 2.22 ผลการวิเคราะห์ซีเมนต์ที่เคลือบด้วยเทคนิค X-ray diffraction..... | 29 |
| รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์ที่เคลือบจากเคลือบขาว..... | 34 |
| รูปที่ 3.2 ทิศทางที่ใช้ในการตัด โม่อะลูมิเนียมด้วยเครื่อง Precision Cutting Machine..... | 36 |
| รูปที่ 3.3 ทิศทางที่ใช้ในการตัด Precursor..... | 37 |
| รูปที่ 3.4 ทิศทางที่ใช้ในการตัด โม่อะลูมิเนียมด้วยเครื่อง Discharge Wire Cut Machine..... | 38 |
| รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของวัสดุผง..... | 40 |
| รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ซีเมนต์ที่เคลือบ..... | 43 |
| รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ผงซิลิกา..... | 43 |
| รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดกับปริมาณอนุภาคเซรามิก (ก.) ซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl (ข.) ซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H ₂ SO ₄ (ค.) ซีเมนต์จากโรงไฟฟ้า ซิลิกาและซิลิกอนคาร์ไบด์..... | 45 |
| รูปที่ 4.5 การขยายตัวของโม่อะลูมิเนียมกับเวลา ของโม่ที่ผสมซีเมนต์ที่เคลือบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 364 μm..... | 46 |
| รูปที่ 4.6 การขยายตัวของโม่อะลูมิเนียมกับเวลา ของโม่ที่ผสมซีเมนต์ที่เคลือบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 199 μm..... | 47 |
| รูปที่ 4.7 การขยายตัวของโม่อะลูมิเนียมกับเวลา ของโม่ที่ผสมซีเมนต์ที่เคลือบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 80 μm..... | 48 |
| รูปที่ 4.8 การขยายตัวของโม่อะลูมิเนียมกับเวลา ของโม่ที่ผสมซีเมนต์ที่เคลือบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 18 μm..... | 49 |
| รูปที่ 4.9 การขยายตัวของโม่อะลูมิเนียมกับเวลา ของโม่ที่ผสมซีเมนต์ที่เคลือบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H ₂ SO ₄ ขนาดเฉลี่ย 401 μm..... | 50 |
| รูปที่ 4.10 การขยายตัวของโม่อะลูมิเนียมกับเวลา ของโม่ที่ผสมซีเมนต์ที่เคลือบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H ₂ SO ₄ ขนาดเฉลี่ย 210 μm..... | 51 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.11 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมกับเวลา ของโพลีที่ผสมขี้เถ้าแกลบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย 75 μm | 52 |
| รูปที่ 4.12 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมกับเวลา ของโพลีที่ผสมขี้เถ้าแกลบ ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย 16 μm | 53 |
| รูปที่ 4.13 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมกับเวลา ของโพลีที่ผสมขี้เถ้าแกลบ จากโรงงานไฟฟ้า ขนาดเฉลี่ย 180 μm | 54 |
| รูปที่ 4.14 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมกับเวลา ของโพลีที่ผสมซิลิกา ขนาดเฉลี่ย 5 μm ... | 55 |
| รูปที่ 4.15 การขยายตัวของโพลีอะลูมิเนียมกับเวลาของโพลีที่ผสม ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเฉลี่ย 7 μm | 56 |
| รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางชิ้นงานหลังอัด..... | 63 |
| รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียม..... | 65 |
| รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวาง Plateau border ของโพลีอะลูมิเนียม..... | 67 |
| รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียม..... | 70 |
| รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสม ขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl..... | 72 |
| รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสม ขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 | 72 |
| รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมขี้เถ้า แกลบจากโรงไฟฟ้า โพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกาและโพลีอะลูมิเนียมที่ผสม ซิลิกอนคาร์ไบด์..... | 73 |
| รูปที่ 5.1 แบบจำลองการรับแรงของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในเนื้ออะลูมิเนียม..... | 83 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโฟมอะลูมิเนียมเริ่มเป็นที่รู้จักและใช้กันแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเฉพาะที่โดดเด่น เช่น มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง, มีสมบัติการนำความร้อนที่ดี และมีสมบัติการดูดซับพลังงานระหว่างการอัดกระแทกที่ดี เป็นต้น

การผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากวิธีหนึ่งก็คือกรรมวิธีโลหะผง เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถผลิตโฟมอะลูมิเนียมให้มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปทรงที่ต้องการได้ ปฏิกิริยาการเกิดโฟมในกรรมวิธีโลหะผงนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาเพียงไม่กี่นาที ในขณะที่โฟมเกิดการขยายตัวนั้น จะเกิดการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานโฟมเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก และการรวมตัวกันของโพรงอากาศในโฟม ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมไม่มีความสม่ำเสมอ เป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลของโฟมอะลูมิเนียมเปลี่ยนไปด้วย

จากการศึกษาการเพิ่มเสถียรภาพให้โฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตจากกรรมวิธีโลหะผงสามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคเซรามิก โดยอนุภาคเซรามิกจะขัดขวางการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานโฟม เนื่องจากอนุภาคเซรามิกจะเพิ่มความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมและยังช่วยลดการรวมตัวกันของโพรงอากาศในโฟม การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมยังเกิดได้จากการที่อนุภาคเซรามิกไปอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอากาศและน้ำโลหะ โดยจะทำให้ความโค้งของผิวสัมผัสเปลี่ยนไปและยังช่วยลดความแตกต่างของความดันระหว่าง Plateau border และผนังโพรงอากาศเป็นผลให้การไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมลดลง

อย่างไรก็ตามอนุภาคเซรามิกแต่ละชนิดที่เติมลงในโฟมอะลูมิเนียมจะส่งผลต่อการเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมที่ต่างกัน ซิ่ถ้าเคลือบเป็นซีเมนต์ที่มีปริมาณออกไซด์สูง ซึ่งมีซิลิกา (SiO_2) อยู่ประมาณ 87-97 wt.% ซิ่ถ้าเคลือบสามารถผลิตได้จากเคลือบขาว ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในประเทศไทยและมีราคาถูก ดังนั้นการทำวิจัยนี้จึงมีขึ้นเพื่อศึกษาผลของการเติมซีเมนต์ต่อการขยายตัว ลักษณะ โครงสร้าง และพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณ ขนาดและประเภทของอนุภาคซีเถ้าเคลือบต่อพฤติกรรมการขยายตัว โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณ ขนาดและประเภทของอนุภาคซีเถ้าเคลือบต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ซีเถ้าเคลือบที่ใช้ในการทดลอง เตรียมจากกระบวนการสกัดจากเคลือบที่ต้มด้วยกรด HCl กรด H_2SO_4 และซีเถ้าเคลือบที่ได้มาจากโรงไฟฟ้า

1.3.2 ตรวจสอบพฤติกรรมการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วน 1, 2, 3 wt.% ของอนุภาคซีเถ้าเคลือบ อนุภาคซิลิกา และอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์

1.3.3 ตรวจสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วน 1, 2, 3 wt.% ของอนุภาคซีเถ้าเคลือบ อนุภาคซิลิกา และอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์

1.3.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม ณ อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศปกติ

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

เคลือบขาวที่มาจากแหล่งที่มาแต่ละแหล่ง เมื่อผลิตเป็นซีเถ้าเคลือบจะได้ปริมาณซิลิกาไม่เท่ากัน

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

โฟมอะลูมิเนียม (Al foam), ไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2), กรรมวิธีโลหะผง (Powder - metallurgy), สมบัติทางกล (Mechanical properties), ซีเถ้าเคลือบ (Rice husk ash)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง

1.6.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการเตรียมซีเถ้าเคลือบจากกระบวนการสกัดจากเคลือบ

1.6.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของปริมาณ ขนาดและประเภทของอนุภาคที่เข้า
แลกเปลี่ยนการขยายตัวและพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

1.6.4 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างมหภาคและโครงสร้าง
จุลภาคต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

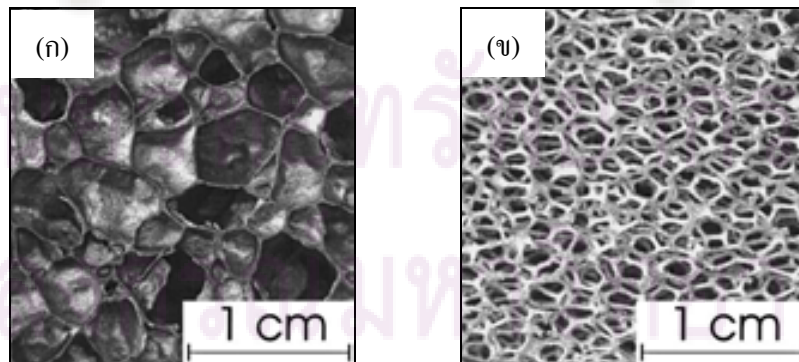
2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันในปริมาตรที่เท่ากัน มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง สามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้ดีและมีสมบัติเด่นอีกหลายประการ [1]

โดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทของโฟมโลหะได้จากรูปร่างของโพรงอากาศ นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างโฟมโลหะด้วยกันยังสามารถบอกได้จากค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ปริมาณของโพรงอากาศ และขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ [2]

2.1.1 ลักษณะรูปร่างของโพรงอากาศในโฟมโลหะ

ลักษณะรูปร่างของโพรงอากาศหรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เซล (Cell) ของโฟมโลหะ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของความพรุน (Porosity) ในโฟมโลหะสามารถจำแนกได้เป็น โพรงอากาศแบบปิด (Closed-cell) และโพรงอากาศแบบเปิด (Open-cell) โดยโพรงอากาศแบบปิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับมีเยื่อหุ้มปิดล้อมรอบโพรงอากาศ ทำให้อากาศ แก๊ส หรือของเหลวไม่สามารถไหลผ่านได้ ดังรูปที่ 2.1(ก) สำหรับโพรงอากาศแบบเปิดนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับร่างแหต่อกันในด้านข้างของโพรงอากาศ ทำให้อากาศ แก๊ส หรือของเหลว สามารถไหลผ่านภายในโครงสร้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข) โดยคุณสมบัติของโฟมโลหะจะขึ้นอยู่กับรูปแบบและโครงสร้างโพรงอากาศของโฟม [2]



รูปที่ 2.1 (ก) โพรงอากาศแบบปิด และ (ข) โพรงอากาศแบบเปิด ตามลำดับ [33]

2.1.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของโฟมโลหะ (ρ^*) ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของโลหะชนิดนั้นๆ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถแสดงได้ในสมการ (1)

$$\% \rho^* = \frac{\rho_f}{\rho_s} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะและ ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งความหนาแน่นของโฟมโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่ต่างกันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติทางกลที่ต่างกัน [2]

2.1.3 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ

ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ (P) ซึ่งมีหน่วยเป็น % สามารถแสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตรของโลหะชนิดนั้นๆ โดยปริมาณของโพรงอากาศแสดงได้ดังสมการ (2)

$$\% P = 100\% - \% \rho^* \quad (2)$$

2.1.4 ขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ

สมบัติทางกลของโฟมโลหะนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดรูปร่างของโพรงอากาศ ความแตกต่างของวิธีการผลิตนั้นส่งผลให้เกิดชนิดของโครงสร้างโพรงอากาศที่ต่างกัน เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ ขนาดของโพรงอากาศที่มีความแตกต่างกัน จะมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงานทดสอบ (Size effect) ซึ่งจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการออกแบบและทดสอบวัสดุ

นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของ โพรงอากาศที่ต่างกันนั้นยังส่งผลให้ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) และความแข็งแรง (Strength) ของโฟมมีค่าแตกต่างกันไป มีการพบว่า ถ้าค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะเป็นไปตามที่กำหนดไว้ รูปร่างของโพรงอากาศจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ อย่างไรก็ตามขนาดของโพรงอากาศก็ยังคงเป็นตัวแปรสำคัญและมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะอยู่ [2]

2.1.5 การนำไปใช้งานสำหรับโพลีโพลีเอทิลีน

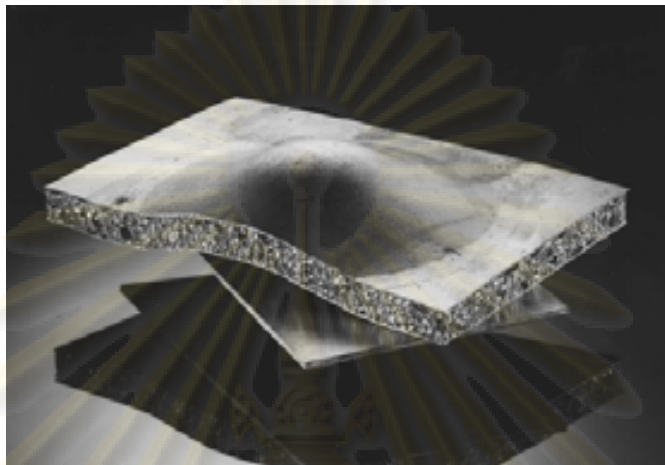
การนำไปใช้งานของโพลีโพลีเอทิลีน จะนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากโพลีโพลีเอทิลีนมีความหนาแน่นต่ำและมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จึงถูกนำไปใช้งานทางด้านโครงสร้างที่ต้องการให้น้ำหนักเบา และความแข็งแรงพอสมควร

ส่วนการนำไปใช้งานด้านอื่นๆ สามารถยกตัวอย่างได้ เช่น ด้านการแพทย์ เนื่องจากสามารถควบคุมความหนาแน่นได้ จึงนำไปอัดเป็นชั้นให้มีลักษณะคล้ายกับส่วนนอกของกระดูกได้ ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ การนำไปใช้งานและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ [2]

| คุณสมบัติ | การนำไปใช้งาน | รูปแบบของผลิตภัณฑ์ |
|---|--|--|
| High specific bending stiffness and strength | - แผ่นวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบาในการขนส่งหรือทางสถาปัตยกรรม | - Shaped parts - (Sandwich) panels - 3d-shaped (Sandwich) panels |
| Isotropic absorption of impact energy at a nearly constant low stress level | - ชิ้นส่วนรองรับแรงในชิ้นส่วนรถยนต์ - วัสดุห่อหุ้ม ป้องกันความเสียหายจากการกระแทก | - Shaped parts - Large panels |
| Good sound absorption, electromagnetic shielding, and vibration damping | - ก่อตั้งบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ - วัสดุป้องกันเสียงจากเครื่องยนต์ - วัสดุดูดซับเสียงบริเวณถนนหรือทางรถไฟ | - Large panels - Sandwich panels |
| High thermal stability and low Thermal conductivity | - ฉนวนป้องกันความร้อน | - Large panels |
| Decorative, non-combustible, weather resistant | - เฟอร์นิเจอร์ - ติคผนัง | - Large panels - Shaped parts |
| Light-weight | - ใสบแบบหล่อทราย - วัสดุลอยน้ำ | - Complex shaped parts with a dense surface skin |
| High inner surface | - อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน - ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา - ใช้งานด้านCryogenic | - Complex open-cell parts |

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัตินำใช้งาน และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ของโพลีโพลีเอทิลีน [2]

โดยรูปที่ 2.2 เป็นรูปของโฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างแบบแซนวิชและรูปที่ 2.3 เป็นรูปของโฟมที่ใช้เป็นภาชนะ ซึ่งเป็นตัวอย่างของการนำไปใช้งานของโฟมโลหะ



รูปที่ 2.2 แผ่นแซนวิชที่บริเวณเนื้อโลหะส่วนกลางทำจากโฟมอะลูมิเนียม [3]



รูปที่ 2.3 ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยโฟมที่ใช้เป็นส่วนประกอบรถยนต์ [31]

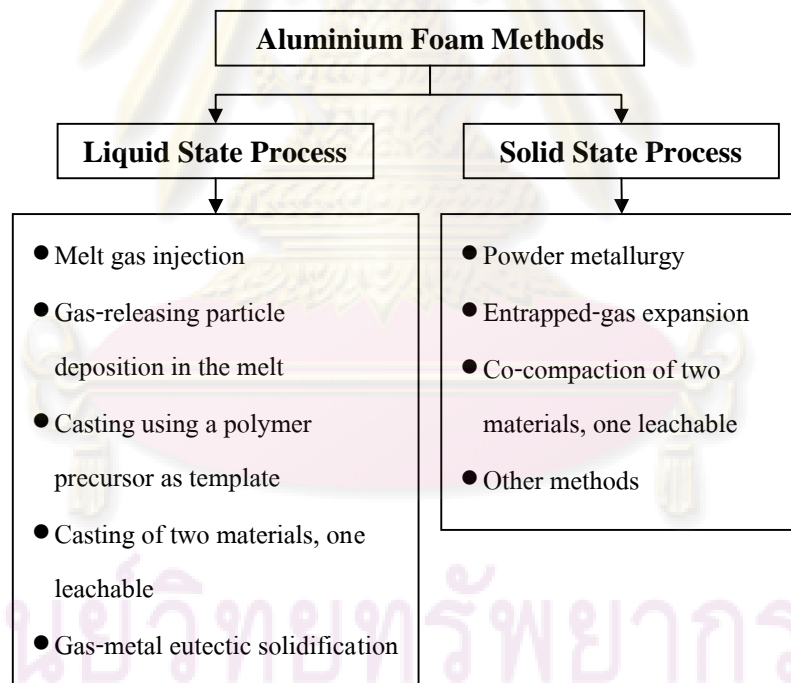
2.2 โฟมอะลูมิเนียม

โฟมอะลูมิเนียม คือ โฟมที่ได้จากการใส่อะลูมิเนียมเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโฟม โดยโฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ประกอบไปด้วยโครงอากาศที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม โฟมอะลูมิเนียมมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูงในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดที่ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับตกแต่งได้อีกด้วย สามารถนำมารีไซเคิลได้และ

ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมสามารถควบคุมได้จากการควบคุมรูปร่างของโครงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียม ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการควบคุมรูปร่างของโครงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้สมบัติทางกลตามที่ต้องการ [4] การใช้งานหลักๆของโฟมอะลูมิเนียม คือ ใช้เป็นอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกในรถยนต์ ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่และใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียงบนถนน [1, 5]

2.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

วิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถจำแนกได้ตามสถานะของอะลูมิเนียมในกระบวนการผลิต โดยวิธีที่นิยมในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 วิธีการที่ใช้แบ่งเป็น การผลิตโฟมจากสถานะของเหลว และการผลิตโฟมจากสถานะของแข็งโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง [2]

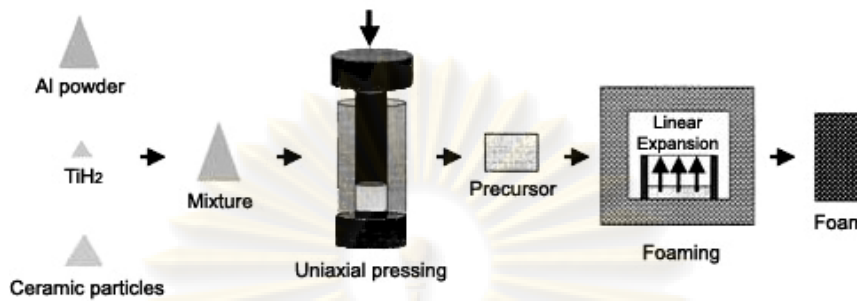


รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการผลิต โฟมอะลูมิเนียมจากสถานะของเหลวและสถานะของแข็ง [2]

2.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผง

กระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมวิธีนี้เริ่มจากการผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับสารที่เป็นตัวสร้างแก๊ส หรือ Foaming agent เพื่อทำให้เกิดโฟมขึ้น โดยทั่วไป Foaming agent มีหลายชนิด เช่น ไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (ZrH_2) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เป็นต้น แต่สำหรับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะนิยมใช้ Foaming agent เป็นไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) และจะใช้ในปริมาณระหว่าง 0.6-1.0 wt.% ซึ่งเพียงพอต่อการสร้างโพรงอากาศภายในโฟม [6,7,8] ผงที่ผ่านการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างดีแล้ว จะถูกนำไปอัดขึ้นรูป ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วจะเรียกว่า “Foamable precursor” หรืออาจเรียกสั้นๆว่า “Precursor” การอัดขึ้นรูปนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบเย็นและแบบร้อน เช่น การอัดด้วยความดันแกนเดียว (Uniaxial pressing) , การอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทางแบบเย็น (Cold-isostatic pressing) การอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทางแบบร้อน (Hot-isostatic pressing) , การอัดผ่านแบบที่อุณหภูมิสูง (Extrusion) การอัดขึ้นรูปที่ใช้ความร้อนนั้นมีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากกว่า เนื่องจากจะได้ความหนาแน่นของ Precursor ที่สูงใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของโลหะ แต่สำหรับผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ การอัดขึ้นรูปแบบเย็นก็สามารถที่จะผลิต Precursor ที่มีความหนาแน่นสูงได้ จากนั้นนำ Precursor ไปใส่ในแม่พิมพ์และนำไปเข้าเตาอบ เมื่อให้ความร้อนแก่ Precursor จนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ 400-450°C จะปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซึ่งจะสร้างโพรงอากาศใน Precursor ที่หลอมเหลวทำให้เกิดการขยายตัวขึ้นและจะได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูพรุนแบบปิด การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผงมีขั้นตอนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.5 โฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตได้จากวิธีโลหะผงจะมีโพรงอากาศแบบปิดและมีขนาดโพรงอากาศ 1-8 mm โฟมมีความพรุน (Porosity) 63-89% [16]

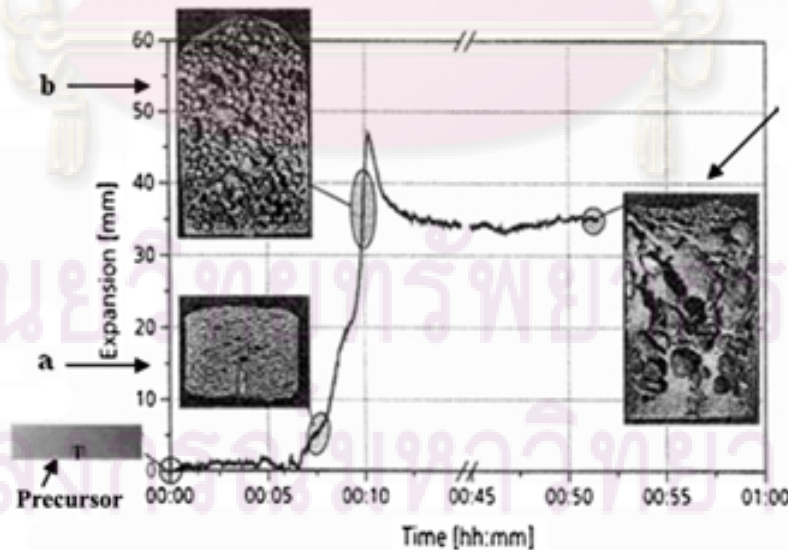
วิธีการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีโลหะผงมีข้อดีคือ สามารถผลิตได้โฟมอะลูมิเนียมที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างที่ต้องการ และมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ผลิตจากกรรมวิธีโลหะเหลว ส่วนข้อเสียของวิธีการนี้คือ มีค่าใช้จ่ายในส่วนของผงโลหะที่สูง และการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ทำได้ยาก [9, 10]



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธีโลหะผง [38]

2.5 กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผง

ระหว่างกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีโลหะผงดำเนินไปนั้น Precursor จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาหนึ่ง ซึ่งกลไกเหล่านี้จะส่งผลต่อรูปร่างของ Precursor เมื่อขยายตัวเป็นโฟมอะลูมิเนียม ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก [11] ดังรูปที่ 2.6 แสดงการขยายตัวและ โครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.6 การขยายตัวและ โครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาต่างๆ [11]

กลไก a - เริ่มเกิดโพรงอากาศ (Initiation and evolution of porosity) ขึ้นภายใน Precursor ในขั้นตอนนี้จะเริ่มเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กขึ้นเนื่องจาก Foaming agent เริ่มเกิดการสลายตัวและให้แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ออกมา โพรงอากาศนี้จะมีรูปร่างขึ้นอยู่กับวิธีการในการขึ้นรูป Precursor ในขั้นตอนนี้นี้ขนาดของ Precursor จะมีการขยายขึ้นประมาณ 0-30%

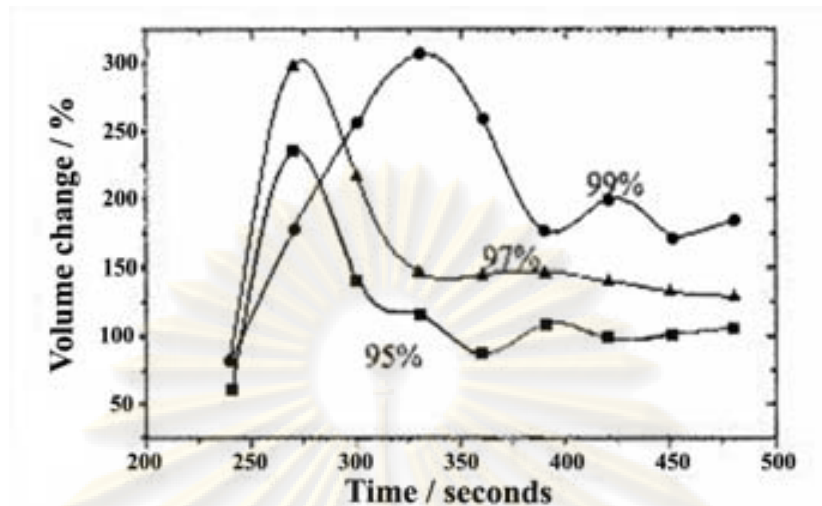
กลไก b - การโตขึ้นของโพรงอากาศ (Pore growth) ในขั้นตอนนี้จะยังคงมีการเริ่มเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่ และโพรงอากาศที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้นี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนหนึ่งเกิดจากปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของ Foaming agent เพิ่มมากขึ้น และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศที่มีอยู่ก่อนหน้า รูปร่างของโพรงอากาศจะเริ่มเปลี่ยนจากแถบยาวในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัดไปเป็นโพรงอากาศที่มีลักษณะกลม เมื่อเวลาผ่านไป โพรงอากาศที่มีรูปร่างกลมจะขยายตัวขึ้นจนกระทั่งไม่มีพื้นที่เพียงพอที่จะเกิดเป็นโพรงอากาศที่มีรูปร่างกลมได้อีก และจะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ในขั้นตอนนี้นี้ขนาดของ Precursor จะมีการขยายตัวขึ้นประมาณ 50-400%

กลไก c - การพังตัวของโครงสร้างโฟม (Collapse) หลังจากที่โพรงอากาศขยายตัวมากที่สุดและการสลายตัวของ Foaming agent ใกล้เคียงลง จะเกิดการพังตัวของโฟมขึ้นทำให้ได้โพรงที่มีรูปร่างผิดปกติ กลไกหลักในการเกิดการพังตัวของโฟม คือ Drainage และ Cell coalescence สำหรับกลไก Drainage เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงโลก และผลของแรงแคปิลลารี (Capillary force) ทำให้อะลูมิเนียมเหลวไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำส่งผลให้บริเวณฐานของโฟมมีลักษณะเป็นชั้นหนาของอะลูมิเนียม การเกิด Cell coalescence เกิดจากการที่โพรงอากาศ 2 โพรงรวมตัวกันเกิดเป็นโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การรวมตัวของโพรงอากาศนี้เป็นผลมาจากการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศ [11]

2.6 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีโลหะผง

2.6.1 ความหนาแน่นของ Precursor

ในการอัดขึ้นรูป Precursor นั้น พบว่าความหนาแน่นของ Precursor จะต้องมีความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) ไม่น้อยกว่า 94% จึงจะทำให้เกิดการขยายตัวได้ [9,10] เนื่องจากที่ความหนาแน่นทางทฤษฎี 94% นั้นเป็นความหนาแน่นที่ช่องว่างในชิ้นงานที่เชื่อมต่อกัน (Interconnected porosities) เปลี่ยนไปเป็นช่องว่างที่ไม่เชื่อมต่อกัน (Closed porosities) อย่างไรก็ตามพบว่าเพื่อให้เกิดการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ดีนั้น จำเป็นที่จะต้องขึ้นรูป Precursor ให้มีความหนาแน่นทางทฤษฎีไม่น้อยกว่า 99% ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ที่ความหนาแน่นของ Precursor ต่างๆ [9]

ถ้าความหนาแน่นของ Precursor ไม่เพียงพอจะทำให้มีรูพรุนเชื่อมต่อกันอยู่ใน Precursor เป็นจำนวนมากส่งผลให้ในระหว่างการอบเพื่อให้เกิดโฟมนั้น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่เกิดจากการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ สามารถแพร่ผ่านช่องว่างที่เชื่อมต่อกันออกไปได้ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดโฟม (Foamability) ของ Precursor ลดลง เมื่อเพิ่มแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป Precursor มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของ Precursor สูงขึ้นส่งผลให้การขยายตัวของ Precursor ในขั้นตอนการอบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูป จะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผนังโลหะเพิ่มมากขึ้นและเกิดการเชื่อมติดกันแบบเย็นของผนังมากขึ้น (Cold welding) ส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจนแพร่ผ่านได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การสูญเสียแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มแรงดันในการอัดขึ้นรูปยังช่วยเพิ่มความเสถียรของโฟม (Stability) มากขึ้น อันเป็นผลมาจากการแตกออกของชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวของผนังอะลูมิเนียม ซึ่งฟิล์มออกไซด์ที่แตกออกนั้นจะมีส่วนช่วยในการป้องกันการยุบตัวของโฟม [12]

2.6.2 ลักษณะและปริมาณของ TiH_2

เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของผนังไทเทเนียมไฮไดรด์ที่ยังไม่ผ่านการอัดขึ้นรูปอยู่ที่ประมาณ $380-570^\circ C$ [11] อย่างไรก็ตามช่วงอุณหภูมินี้ใช้ได้เฉพาะกับผนังไทเทเนียมไฮไดรด์ที่ยังไม่ผ่านการอัดขึ้นรูปเท่านั้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ ยังขึ้นอยู่กับอัตราการให้ความร้อนอีกด้วย จากการศึกษาของ F. Von Zeppelin et al. [13] พบว่าการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์นั้นขึ้นอยู่กับบรรยากาศที่ให้ความร้อน ถ้าในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่เพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์เปลี่ยนไป

เนื่องจากออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมไฮไดรด์เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ชั้น ซึ่งชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์เพิ่มขึ้น [13, 14]

นอกจากนี้แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปก็มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ด้วย เนื่องจากหากใช้แรงดันที่สูงเพียงพอที่จะทำให้ไทเทเนียมไฮไดรด์ที่มีลักษณะเปราะเกิดการแตกออก จะทำให้เกิดผิวใหม่ที่ไม่ขึ้นฟิล์มออกไซด์ปกคลุมส่งผลให้ความสามารถในการสลายตัวเกิดได้ง่ายขึ้น จากการศึกษาของ S. W. Youn และ C. G. Kang [15] พบว่าปริมาณของไทเทเนียมไฮไดรด์มีผลต่อรูปร่างของโพรงอากาศภายในโครงสร้างโฟม โดยเมื่อปริมาณของไทเทเนียมไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจะทำให้โพรงอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

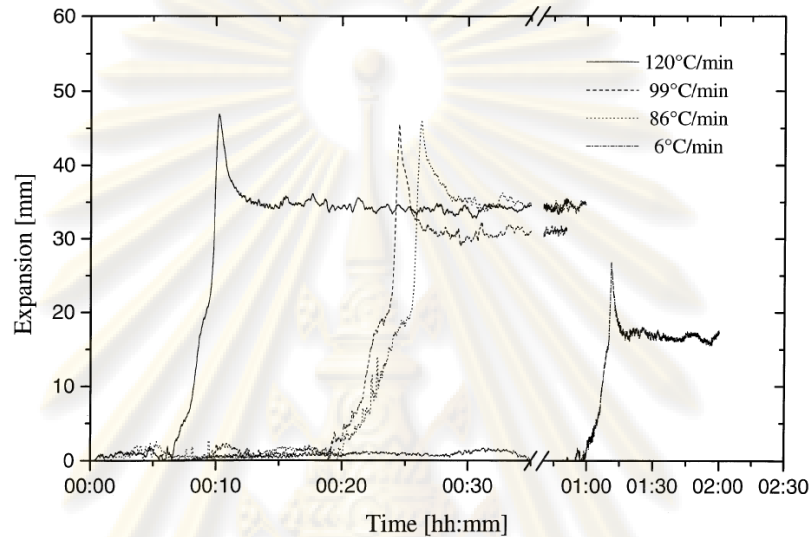
2.6.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟม

จากการศึกษาของ I. Duarte and J. Banhart [11] ถึงผลของอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้ในการผลิตโฟมที่ทำจาก AISi7 และ อะลูมิเนียมเกรด 6061 โดยมีการใช้อุณหภูมิในช่วง 600-800°C พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมมีผลต่อกระบวนการผลิตโฟมเป็นอย่างมาก โดยที่ถ้าอุณหภูมิสุดท้ายในการผลิตโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิ Solidus ของโลหะผสมแล้ว การขยายตัวที่เกิดขึ้นจะเป็นเพียงการขยายตัวในสถานะของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอยู่ในช่วงของอุณหภูมิ Solidus/Liquidus จึงพบการขยายตัวของโฟมเกิดขึ้น และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงมากขึ้นจะทำให้เกิดการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์มากขึ้น และมีผลให้ความหนืดของโลหะเหลวลดลงจึงส่งผลให้เกิดการขยายตัวของโฟมมากขึ้น จากการศึกษาของ S. W. Youn และ C. G. Kang [15] พบว่าการขยายตัวของโฟมในขั้นต้นนั้นจะมีลักษณะของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การขยายตัวสูงมากขึ้น และที่อัตราการขยายตัวสูงจะเกิดความแตกต่างของความดันระหว่างโพรงอากาศมากขึ้นจึงทำให้ผนังโพรงอากาศแตกออก เกิดการรวมกันของโพรงอากาศและทำให้โพรงอากาศจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (Coarsening)

2.6.4 อัตราการให้ความร้อน

จากการศึกษาถึงผลของอัตราการให้ความร้อนต่อการผลิตโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมเกรด 6061 ได้ผลเป็นไปดังรูปที่ 2.8 ที่อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น จะเกิดการขยายตัวของ Precursor เร็วกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากเกิดการหลอมเหลวของ Precursor ที่เร็วกว่านั่นเอง และที่อัตราการให้ความร้อนไม่แตกต่างกันมากนักพบว่า อัตราการขยายตัวของ Precursor มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำกว่ามากพบว่าอัตราการขยายตัวสูงสุดของ Precursor มีค่าต่ำกว่าที่อัตราการให้ความร้อนอื่นๆ ซึ่งเหตุผลที่อาจเป็นไปได้เนื่องมาจาก (1) แก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์ได้แพร่ออกไปจาก Precursor ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า

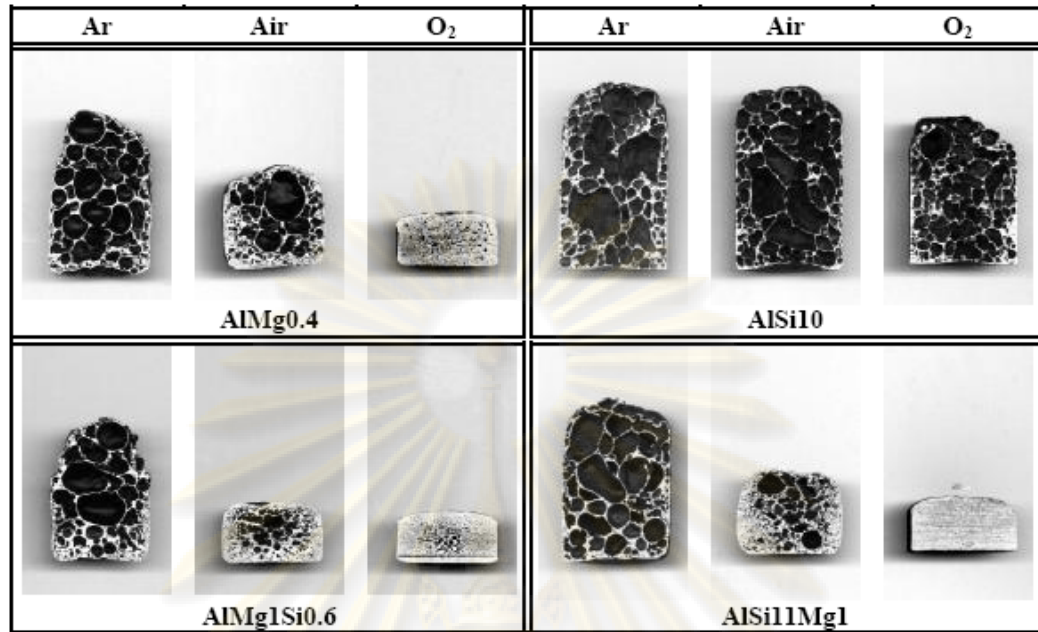
500°C เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของไทเทเนียมไฮไดรด์อย่างรวดเร็ว (2) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ขึ้นที่ผิวของผง Precursor และบริเวณภายในของ Precursor ที่อากาศสามารถผ่านเข้าไปได้ ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีจุดหลอมเหลวสูงมากจึงทำให้อยู่ในสถานะของแข็งตลอดทั้งกระบวนการผลิตโฟม และมีส่วนในการยับยั้งการขยายตัวของ Precursor



รูปที่ 2.8 การขยายตัวของอะลูมิเนียม 6061 ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆที่อุณหภูมิเตา 800°C [11]

2.6.5 บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

เพื่อให้การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมเกิดขึ้นมากที่สุด บรรยากาศและความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม บรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมมีผลโดยตรงต่อการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมอะลูมิเนียม พบว่าบรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) จะมีผลทำให้การขยายตัวของโฟมที่ทำจากโลหะผสมที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียม (Mg) เพิ่มขึ้น สำหรับในโลหะผสมที่มีแนวโน้มการเกิดออกซิเดชันต่ำ ชนิดของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมจะมีผลต่อการขยายตัวของโฟมเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.9 สำหรับโฟมอะลูมิเนียมที่ไม่มีส่วนผสมของแมกนีเซียมจะมีการขยายตัวใกล้เคียงกันเมื่อชนิดของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตต่างกัน



รูปที่ 2.9 ผลของบรรยากาศที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนเดียวกัน [19]

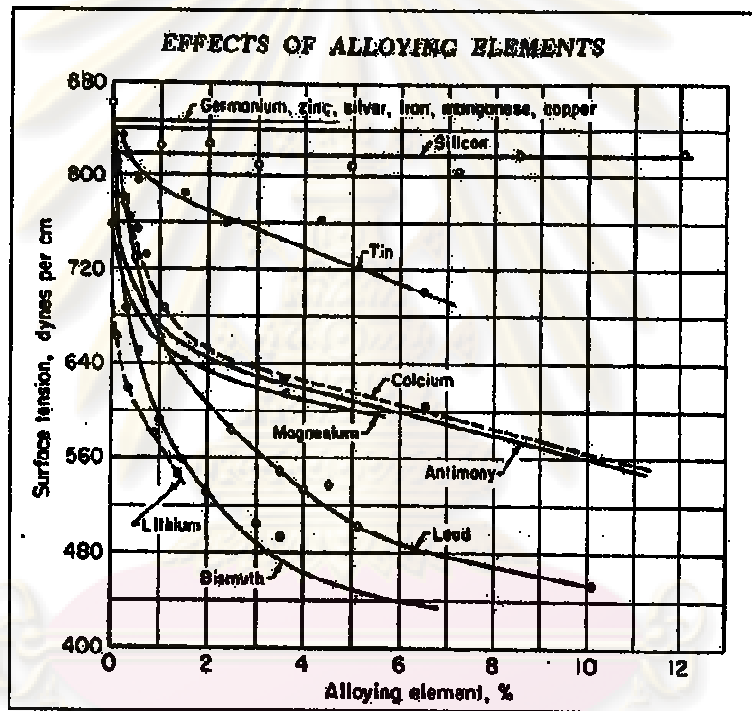
สำหรับความดันบรรยากาศภายนอกที่ให้กับโฟมในขั้นตอนการผลิตก็มีผลต่อการขยายตัวของโฟมเช่นกัน โดยที่การลดลงของความดันบรรยากาศภายนอกทำให้ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าของโฟมและความดันในโพรงอากาศในขณะที่กำลังขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการขยายตัวของผิวหน้าโฟมมากขึ้น ดังรูปที่ 2.10 แสดงผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.10 ผลของความดันภายนอกที่มีต่อการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม [19]

2.6.6 ธาตุผสม

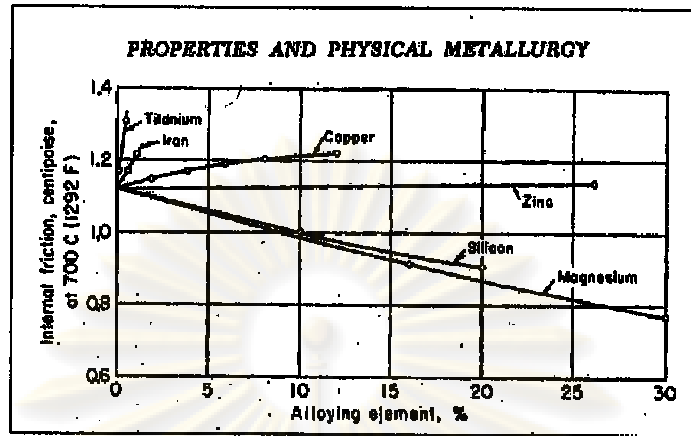
ธาตุผสมที่เติมเข้าไปในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีผลต่อแรงตึงผิวและความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมในขณะที่ทำการผลิตโฟม แรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดลงเมื่อเติมธาตุผสม เช่น Bi, Ca, Li, Mg, Pb, Sb, หรือ Sn ในทางตรงกันข้าม การเติม Ag, Cu, Fe, Ge, Mn, Si หรือ Zn จะให้ผลที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.11 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีผลต่อแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.11 ผลของธาตุผสมที่มีต่อแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [20]

การเติม Cu, Fe และ Ti จะช่วยเพิ่มความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม แต่ความหนืดจะลดลงเมื่อมีการเติม Mg และ Si ส่วนการเติม Zn จะมีผลต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.12 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [20]

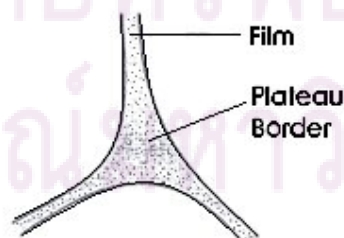
2.7 การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม (Stabilization of Al foam)

ในกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจะมีการถ่ายเทมวลสาร (Transport phenomena) ที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วย [16]

- **Gravitational sedimentation (Drainage)** คือ การไหลของน้ำโลหะเหลวไปที่ฐานของโฟมเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก

- การบางลงของผนังโพรงอากาศเนื่องจากแรงแคปิลลารี (**Capillarity-driven cell wall thinning**) เกิดเนื่องจากการไหลของน้ำโลหะเหลวจากบริเวณผนังโพรงอากาศไปยังบริเวณ Plateau border เนื่องจากผลของความแตกต่างระหว่างแรงตึงผิวของทั้ง 2 บริเวณ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างบริเวณทั้ง 2 ดังรูปที่ 2.13 แสดงภาพบริเวณ Plateau border

- **Interbubble gas diffusion** เกิดจากความแตกต่างของความดันแก๊สระหว่างโพรงอากาศที่มีขนาดต่างกัน



รูปที่ 2.13 บริเวณ Plateau border [24]

ปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีผลทำให้โฟมที่ได้ไม่มีเสถียรภาพ เช่น เกิดการหยาบขึ้นของ โพรงอากาศ (Coarsening), การผสมรวมกันของโพรงอากาศ (Cell coalescence) และการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศ (Cell wall rupture) เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่า การสร้างเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียมสามารถทำได้โดย

- (I) เพิ่มความหนืดให้กับน้ำโลหะ
- (II) เพิ่มความหนืดให้กับผนังโพรงอากาศ และผนังของ Plateau borders
- (III) การลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะ

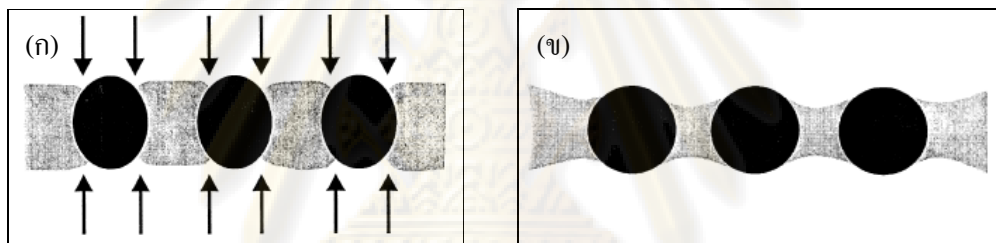
2.7.1 การเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมด้วยการผสมอนุภาคของแข็ง

การเติมอนุภาคของแข็งเข้าไปใน Precursor ถือเป็น การเพิ่มเสถียรภาพให้กับโฟมอะลูมิเนียมอย่างหนึ่ง โดยอนุภาคของแข็งจะขัดขวางการไหลของน้ำโลหะจึงส่งผลให้น้ำโลหะมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิด Drainage น้อยลง นอกจากนี้ การที่อนุภาคของแข็งไปอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างแก๊สกับของเหลวยังมีผลต่อความโค้ง (Curvature) ของรอยต่อในบริเวณนั้นด้วย ดังรูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนไปของความโค้งของผนังโพรงอากาศเมื่ออนุภาคของแข็งไปอยู่ระหว่างรอยต่อของแก๊สกับของเหลว สำหรับกรณีที่ไม่มีการเติมอนุภาคของแข็งพบว่า Capillary pressure บริเวณผนังโพรงอากาศ (P_{Film}) มีค่ามากกว่าบริเวณ Plateau border (P_{pb}) ส่งผลให้น้ำโลหะไหลจากบริเวณผนังโพรงอากาศไปบริเวณ Plateau border เป็นผลให้เกิด Drainage มากขึ้น แต่เมื่อมีอนุภาคของแข็งอยู่ที่รอยต่อระหว่างแก๊สกับของเหลว ทำให้ความโค้งของผนังโพรงอากาศบริเวณนั้นเปลี่ยนไป ส่งผลทำให้ P_{Film} และ P_{pb} มีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้การเกิด Drainage ภายในโครงสร้างโฟมลดลง [24]

| | Without Particles | With Particles |
|----------------|--|--|
| | | |
| Film | | |
| Plateau Border | | |
| | $P_{\text{Gas}} = P_{\text{film}} > P_{\text{pb}}$ | $P_{\text{Gas}} > P_{\text{film}} = P_{\text{pb}}$ |

รูปที่ 2.14 แสดงผลของอนุภาคของแข็งต่อการลดลงของ Capillary pressure ระหว่างบริเวณ Plateau border และ Film [24]

การเติมอนุภาคของแข็งลงในน้ำโลหะนั้นนอกจากจะช่วยเพิ่มความหนืดของน้ำโลหะแล้ว ยังช่วยเพิ่มความหนืดให้กับผนังโพรงอากาศอีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปียก (Wettability) ของอนุภาคที่เติมลงไป อนุภาคที่มีการเปียกบางส่วนจะช่วยเพิ่มความหนืดผิว (Surface viscosity) ให้กับน้ำโลหะอะลูมิเนียม เนื่องจากอนุภาคที่มีการเปียกบางส่วนจะอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับแก๊ส (Metal-gas interface) ส่วนการเพิ่มขึ้นของความหนืดผิวจะช่วยลดการเกิด Drainage และลดการบางลงของผนังโพรงอากาศ ในกรณีที่ผนังโพรงอากาศบางลงจนมีความหนาใกล้เคียงกับขนาดของอนุภาคของแข็ง ความสามารถในการเปียกของอนุภาคจะส่งผลต่อผนังโพรงอากาศแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.15 แสดงผลของความสามารถในการเปียกของอนุภาคของแข็งในน้ำโลหะ สำหรับอนุภาคที่ไม่เปียก ดังรูปที่ 2.15(ก) น้ำโลหะจะเคลื่อนห่างออกจากผิวของอนุภาคในบริเวณที่ถูกครีชี เป็นผลให้ผนังโพรงอากาศถีกขาดอย่างรวดเร็ว ส่วนอนุภาคที่เปียกในน้ำโลหะ ดังรูปที่ 2.15(ข) น้ำโลหะจะเกาะติดกับผิวของอนุภาค ส่งผลให้ผนังโพรงอากาศถีกขาดได้ยากขึ้น

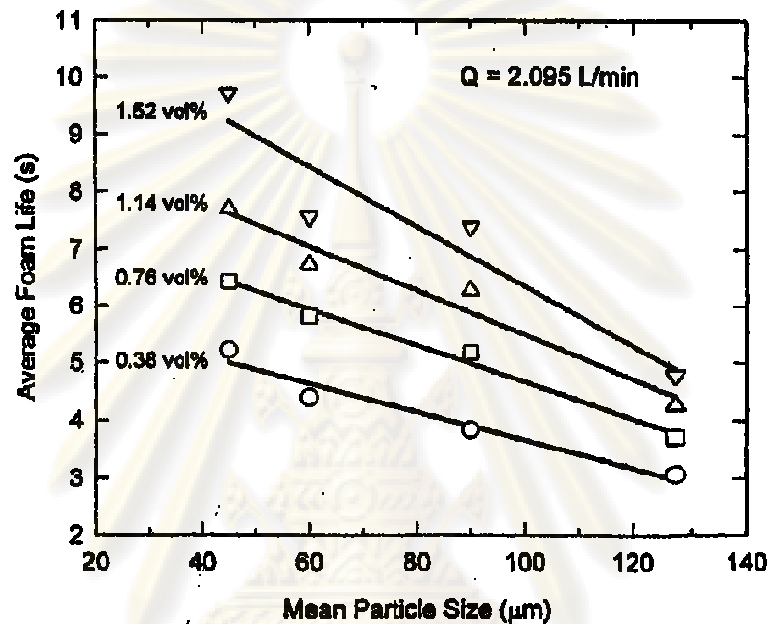


รูปที่ 2.15 แสดงผลของความสามารถในการเปียกของอนุภาคของแข็งในน้ำโลหะเหลว

(ก) อนุภาคที่ไม่เปียก (Non-wetting particle) (ข) อนุภาคที่เปียก (Wetting particle) [24]

นอกจากนี้ขนาด ปริมาณ และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่เติมลงในโฟมอะลูมิเนียมยังมีผลต่อเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียมด้วย [16,17] โดยส่งผลต่อกลไกในการเพิ่มความหนืดเชิงปริมาตร (Bulk viscosity) ของโฟม การเพิ่มขึ้นของ Bulk viscosity จะช่วยลดการเกิด Drainage และการบางลงของผนังโพรงอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถยับยั้งการเกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและการขยายตัวของโพรงอากาศซึ่งเกิดจากการถีกขาดของผนังโพรงอากาศที่บางลงได้ ดังรูปที่ 2.16 แสดงผลของขนาดและปริมาณของซิลิกา (SiO_2) ที่เติมเข้าไปต่อความเสถียรของฟองอากาศในน้ำ โดยที่ใช้อัตราการฟองอากาศ (Q) เท่ากับ 2.095 l/min กรณีที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคเท่ากัน ฟองอากาศนี้จะสามารถอยู่ได้นานขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคซิลิกาเล็กลง เนื่องจากที่อัตราส่วนปริมาตรของอนุภาคซิลิกาเท่ากัน เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก ปริมาณและพื้นที่ผิวของอนุภาคมีจำนวนมากขึ้น ทำให้จำนวนอนุภาคที่เกาะบริเวณรอยต่อระหว่างแก๊สและน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ผนังของฟองอากาศแข็งแรงมากขึ้น และอนุภาคที่เกาะอยู่ในบริเวณรอยต่อระหว่างแก๊สและน้ำยังช่วยยับยั้งการไหลของน้ำให้น้อยลงอีกด้วย จึงทำให้ฟองอากาศสามารถอยู่ได้นานขึ้น

จากรูปที่ 2.16 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าที่ขนาดของอนุภาคซิลิกาเท่ากัน ฟองอากาศของน้ำยังอยู่ได้นานขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคในน้ำมากขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่ออนุภาคซิลิกามีขนาดเล็กลง เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กลงทำให้มีพื้นที่ผิวที่อนุภาคสัมผัสกับฟองอากาศมีมากขึ้น ทำให้เพิ่มการยับยั้งการไหลของน้ำและยังมีผลทำให้น้ำมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ฟองอากาศสามารถอยู่ได้นานขึ้น



รูปที่ 2.16 ผลของขนาดและปริมาณของซิลิกา (SiO_2) ที่เติมเข้าไปต่อความเสถียรของโมเดลน้ำ [24]

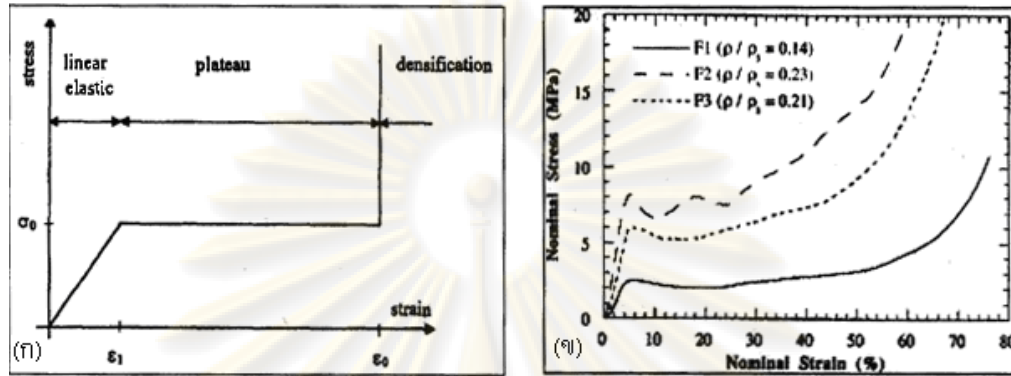
2.8 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมนั้นมีอยู่หลายปัจจัย เช่น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ชนิดของธาตุผสม (Alloying elements) ลักษณะของโพรงอากาศ (Pore morphology) และขนาดของโพรงอากาศ (Pore size) เป็นต้น แต่การนำไปใช้งานส่วนใหญ่มักนำไปใช้เป็นส่วนประกอบที่มีหน้าที่รับแรง ดังนั้นในการวิจัยจึงมักจะศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมรับแรงอัด และการดูดซับแรงกระแทกของโฟมอะลูมิเนียมเป็นหลัก

2.8.1 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

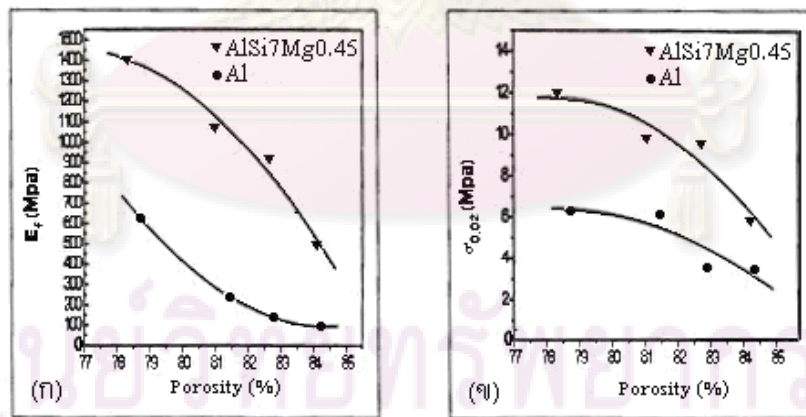
สำหรับโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบรูพรุนจะมีขั้นตอนการเปลี่ยนรูปแบบภายใต้แรงอัดอยู่ 3 ขั้นตอน คือ การเปลี่ยนรูปอีลาสติกแบบเส้นตรง (Linear elastic) บริเวณที่ราบ (Plateau regime) และ การอัดแน่น (Densification) ดังแสดงในรูปที่ 2.17(a) และเมื่อความหนาแน่น

ของโฟมอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้โฟมอะลูมิเนียมสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17(b)



รูปที่ 2.17 (ก) Stress-Strain curve ของโฟมโลหะในอุดมคติ (ข) Stress-Strain curve ของโฟมโลหะที่ได้จากการทดสอบจริง [21]

เมื่อโฟมรับแรงอัดจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก ซึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้น ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น และความเค้นแรงอัดจะลดลงเมื่อมีปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของรูพรุนที่มีต่อค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น และความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสม AlSi7Mg0.45



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโฟมที่ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสม AlSi7Mg0.45 (ก) Young's modulus (ข) ความเค้นแรงอัด [23]

บริเวณที่เส้นกราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าคงที่ (Plateau regime) ความเค้นมีค่าคงที่ ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น สาเหตุเนื่องจากการเริ่มเกิดและขยายตัวของแถบการเปลี่ยนรูป (Deformation band) ภายในโฟม และจะเกิดการเปลี่ยนรูปจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการอัดแน่นของ

โฟม (Densification) ในช่วงสุดท้ายของการเปลี่ยนรูป ความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น โพรงอากาศที่เปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะส่งผลให้โพรงอากาศข้างเคียงรับแรงได้น้อยลง นำไปสู่การพังของโพรงอากาศข้างเคียงในที่สุด

สำหรับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโฟมภายใต้แรงอัด มีทั้งการเปลี่ยนรูปของโพรงอากาศแบบอลาสติก และแบบพลาสติก สำหรับการเปลี่ยนรูปแบบอลาสติกนั้น L. J. Gibson [30] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัดส่วนมอดุลัสของโฟมกับของแข็ง (E^*/E_s) กับค่าสัดส่วนความหนาแน่นของโฟมกับของแข็ง (ρ^*/ρ_s) ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C_1' \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.1)$$

| | | | |
|--------|-------------|-----|--------------------------------|
| 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 |

ส่วนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟมได้ถูกแสดงไว้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟมกับของแข็ง $\left(\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \right)$ กับค่าสัดส่วนความหนาแน่นของโฟมกับของแข็ง $\left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$ ดังสมการที่ 2.2

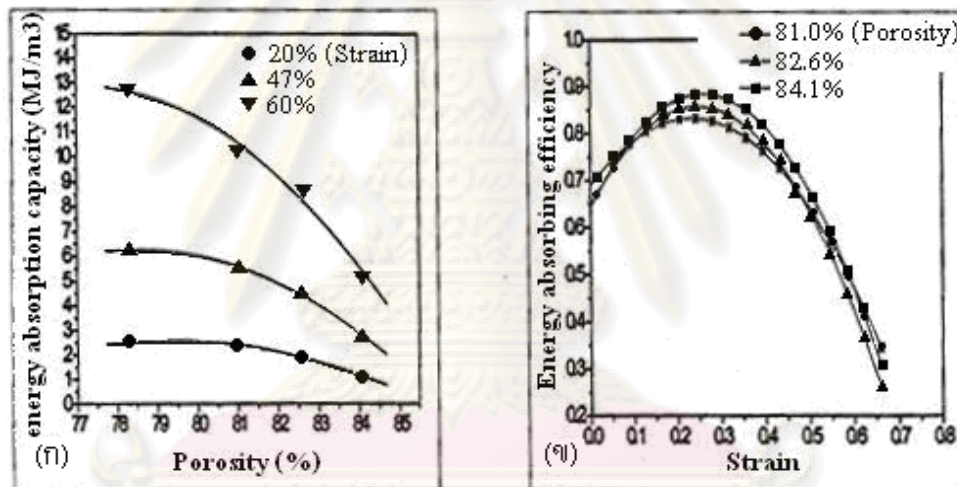
$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_3' \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.2)$$

| | | | |
|--------|-----------------|-----|---|
| โดยที่ | σ_{pl}^* | คือ | ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟม |
| | σ_{ys} | คือ | ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของของแข็ง |
| | C_3, C_3' | คือ | ค่าคงที่ มีค่า $C_3 = 0.33$ และ $C_3' = 0.44$ |

สำหรับอะลูมิเนียมทั่วไปจะมีค่า $E_s = 70$ GPa , $\sigma_s = 300$ MPa และ $\rho_s = 2.7$ g/cm³

2.8.2 การดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม

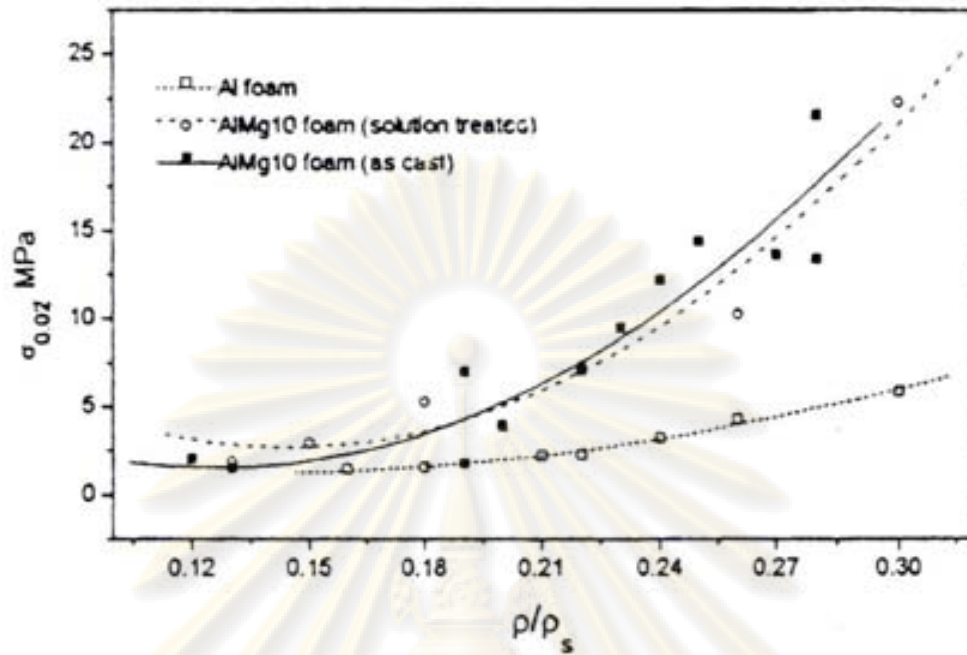
เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมมีช่วงที่กราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าคงที่กว้าง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption) ได้มากก่อนที่จะเกิดการแตกหักเสียหาย จึงเหมาะที่จะใช้เป็นอุปกรณ์ในการรับแรงกระแทก อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับพลังงานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง [23] ดังรูปที่ 2.19(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณรูพรุนของโฟมโลหะผสมที่ทำมาจาก AISi7Mg0.45 พบว่าภายใต้ความเค้นเดียวกันความสามารถในการดูดซับพลังงานมีค่าลดลงเมื่อปริมาณรูพรุนของโฟมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานของโฟมยังเปลี่ยนแปลงตามระดับของความเครียดอีกด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.19(ข) และพบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุดจะขึ้นกับระดับของความเครียดอีกด้วย



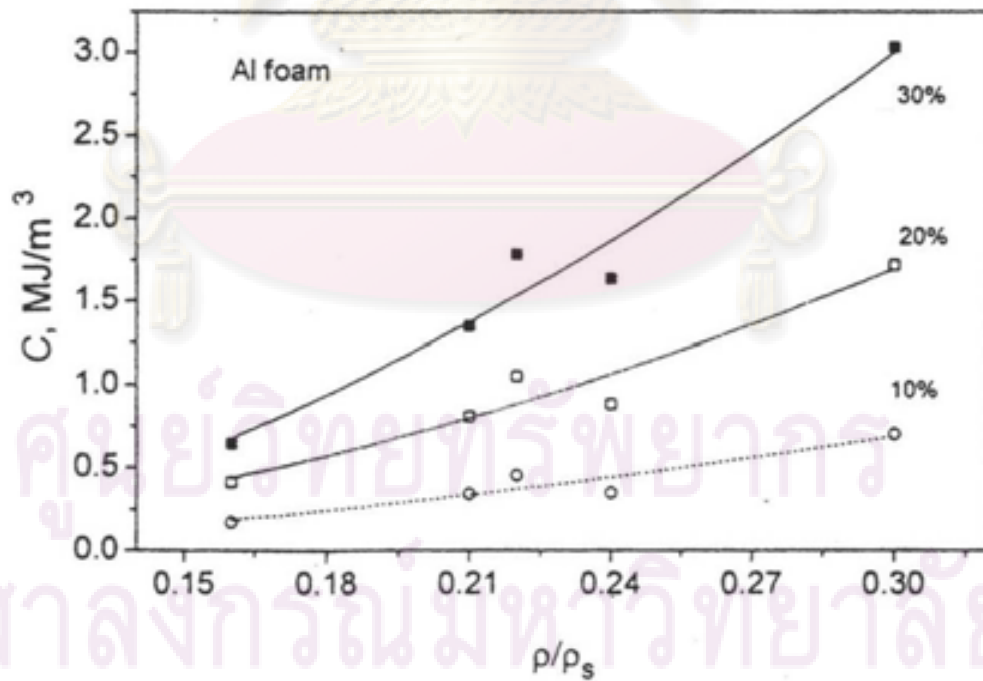
รูปที่ 2.19 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับปริมาณรูพรุนของโฟม และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับพลังงานกับความเครียดของโลหะผสม

AISi7Mg0.45 [23]

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม คือ ความหนาแน่นของโฟม วัสดุผสม และปัจจัยอื่นๆ รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับพฤติกรรมรับแรงอัดของโฟมต่างชนิดกัน และ รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม พบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับพฤติกรรมรับแรงอัดของโฟมต่างชนิดกัน [32]



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม [32]

2.9 แกลบข้าว

2.9.1 ส่วนประกอบของแกลบข้าว

ส่วนประกอบที่สำคัญของแกลบขึ้นอยู่กับ วิธีการทางการเกษตร ลักษณะภูมิประเทศ และลักษณะทางภูมิอากาศ จากข้อมูลนี้มีผลต่อการเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของขี้เถ้าแกลบ และวิธีการในการวิเคราะห์ส่วนประกอบที่สำคัญในแกลบข้าวแสดงในตารางที่ 2.2

| ส่วนประกอบ | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|------------|------------------|
| เซลลูโลส | 34-44 |
| ลิกนิน | 19-47 |
| น้ำตาล * | 17-26 |
| เถ้าแกลบ | 13-29 |
| ความชื้น | 8.5-11.0 |

* ดี-ไซโรส, แอล-อะราบิโนส, ดี-กาแลคโตส, กรดเมธิลกลูโคโรนิก

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของแกลบ [40]

ส่วนประกอบของแกลบที่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อแยกสลายเป็นธาตุพื้นฐานจะประกอบด้วยคาร์บอน (C) 51.2% ไฮโดรเจน (H) 6.9% และ ออกซิเจน (O) 41.9 wt.% ในแกลบจะประกอบด้วย ขี้เถ้าแกลบ 13.29 wt.% ซึ่งพบว่าในขี้เถ้าแกลบจะมีส่วนประกอบซิลิกา (SiO_2) อยู่สูงถึง 87-97 wt.% โดยมีความแตกต่างกันบ้างตามแหล่งที่เพาะปลูก ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าในขี้เถ้าแกลบจะมีปริมาณของซิลิกาอยู่สูงถึง 92.95% และปริมาณของ ซิลิกาจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการสกัดด้วยกรด HCl [29]

2.9.2 ซิลิกาในแกลบข้าว

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางเคมี คือ SiO_2 โดยซิลิกานั้นมีหลายชนิดแตกต่างกันตามลักษณะของอนุภาคของเนื้อสาร ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 2 กลุ่ม คือ

2.9.2.1 ซิลิกาผลึก (Crystalline silica) สามารถแบ่งย่อยออกเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา โดยรูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว ตัวอย่างของซิลิกาที่มีลักษณะเป็นผลึก เช่น Low-temperature quartz มีรูปผลึกเป็นแบบสามเหลี่ยม, High-temperature quartz มีรูปผลึกเป็นแบบหกเหลี่ยม, Low-temperature cristobalite มีรูปร่างผลึกเป็นแบบสี่เหลี่ยม,

High-temperature cristobalite มีรูปร่างผลึกเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์, Low-temperature tridymite มีรูปร่างผลึกเป็นเส้นยาว เป็นต้น

2.9.2.2 ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica หรือ Non-crystalline silica) เป็นอนุภาคที่มีส่วนประกอบรูปร่างไม่เป็นผลึก ซึ่งแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 3 กลุ่ม คือ

- **Vitreous silica** เป็นซิลิกาที่ใช้ทำแก้ว มีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด มีขนาดเล็กเกิดจากการหลอมซิลิกาชนิดผลึก

- **Silica gels** เป็นซิลิกาที่มีรูขนาดเล็ก (Micro porous) อยู่เป็นจำนวนมาก มีพื้นที่ผิวอนุภาคสูง ตัวอย่างของซิลิกาชนิดนี้ ได้แก่ Aqua gels , Alco gel , Xero gels , Aero gels เป็นต้น

- **Silica powder** เป็นซิลิกาที่มีส่วนประกอบของโครงสร้าง ที่มีขนาดเล็กมากในระดับ 10^{-6} ถึง 10^{-9} m ตัวอย่างของซิลิกาชนิดนี้ เช่น ผงเควจาเจนิก (Aquagenic powder) ซึ่งได้จากการตกตะกอนของสารละลาย, Aquagenic pyrogenic powders ได้จากการระเหยเอาส่วนที่เป็น น้ำในซิลิกาออกไปโดยการให้ความร้อนในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ผงไบโอเจนิก (Biogenic powder) เป็นซิลิกาชนิดผงเควจาเจนิกที่สร้างขึ้นในพืชหรือไดอะตอม

| | เจ้าแกลบ | เจ้าแกลบ ต้มกรดHCl |
|--------------------------------|----------|-----------------------|
| SiO ₂ | 92.95 | 96.94 |
| TiO ₂ | 0.02 | 0.02 |
| Al ₂ O ₃ | 0.31 | 0.13 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.26 | 0.02 |
| MnO | 0.12 | 0.01 |
| MgO | 0.55 | 0.04 |
| CaO | 0.53 | 0.05 |
| Na ₂ O | 0.08 | 0.03 |
| K ₂ O | 2.06 | 0.49 |
| Ig. Loss | 1.97 | n.d. |
| Total(%) | 98.86 | 97.72 |

* Fe₂O₃: total iron as Fe₂O₃. n.d.: not determined.

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของจีเจ้าแกลบและจีเจ้าแกลบที่ได้จากแกลบที่ผ่านการสกัดด้วย

กรด HCl [29]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.9.3 ประโยชน์ของซิลิกา

ซิลิกาได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมสำหรับผลิตสินค้าต่างๆ และใช้ในการผลิตวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมตลอดจนงานทางวิทยาศาสตร์ ทั้งนี้ ประโยชน์และการใช้งานของซิลิกาโดยทั่วไปพอสรุปได้ดังนี้

1. เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นแก่สารอื่น เช่น ยาง พลาสติกและสารพอลิเมอร์ อื่นๆ
2. เป็นสารลดแรงยึดระหว่างผิวของแข็ง เช่น ป้องกันการแตกร้าว หรือ การอัดตัวอย่างแน่นหนาของวัสดุ
3. เป็นสารเพิ่มแรงยึดติด โดยเฉพาะในกา
4. เป็นสารเพิ่มความหนืดในของเหลว เช่น ในสี หมึก จารบี และเครื่องสำอาง
5. เป็นสารเพิ่มความเงา (Optical effects)
6. เป็นสารช่วยเพิ่มการกันน้ำ (Hydrophobic หรือ Water-repellent)
7. เป็นสารดูดซึม (Absorbent) ใช้เฉพาะซิลิกาชนิด Silica gels
8. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เฉพาะ ซิลิกาชนิด Reactive
9. เป็นสารบรรจุในคอลัมน์เพื่อวิเคราะห์ (Chromatographic column packing)
10. ใส่ในสีที่ฉีดพ่นเพื่อป้องกันการอุดตันของหัวฉีด
11. ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงวัสดุ ที่ใช้งานที่ความร้อนสูง

2.9.4 การสะสมของซิลิกาในพืช

การสะสมของซิลิกาในพืชเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน โดยพืชจะดูดซิลิกาที่เป็นอนุภาคเล็กๆ ซึ่งละลายอยู่ในน้ำขึ้นสู่ลำต้น โดยผ่านทางรากแล้วจึงไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช ทำให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์อยู่ในส่วนต่างๆ และจัดอยู่ในรูปของซิลิกาชนิดผง ซึ่งหากมีวิธีใดกำจัดส่วนสารอินทรีย์ สิ่งปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ ชนิดอนุผลของประจุบวกออกไปโดยไม่ทำลายความบริสุทธิ์และโครงสร้างของซิลิกาแล้วจะสามารถเตรียมซิลิกาที่มีคุณภาพสูงมากได้

2.9.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตซีเมนต์

1. แหล่งที่มาของแกลบข้าว แหล่งที่มาของแกลบข้าวในแต่ละแหล่งจะให้แกลบข้าวที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของสภาพอากาศและชนิดของดินที่ใช้ปลูก รวมทั้งพันธุ์ของต้นข้าว ดังนั้นแกลบข้าวที่มาจากแต่ละแหล่งได้เป็นซีเมนต์ที่แตกต่างกัน

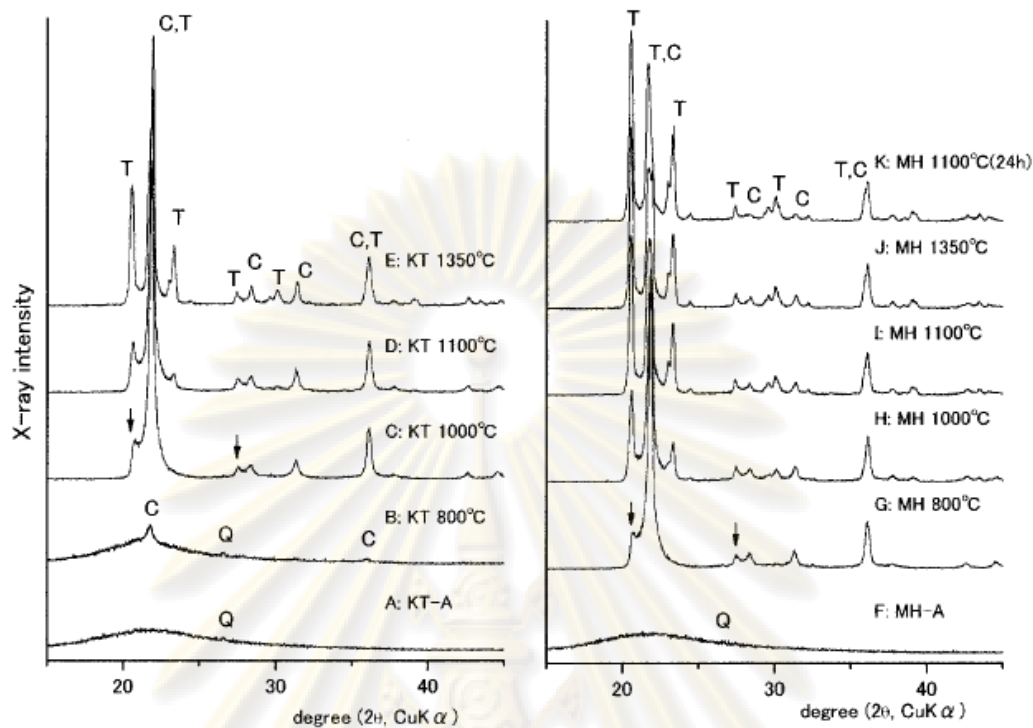
2. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาแกลบ ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบต่ำเกินไป จะส่งผลให้การเกิดออกซิเดชันของคาร์บอนในแกลบข้าวจะเกิดขึ้นช้ามากรวมไปถึงโครงสร้างของชี้แกลบที่ได้ นอกจากนั้นเวลาที่ใช้ในการเผาแกลบก็มีผลต่อโครงสร้างของชี้แกลบเช่นกัน โดยที่ชี้แกลบจะแสดงโครงสร้างเป็นผลึกมากขึ้นถ้าเวลาที่ใช้ในการเผาแกลบนานขึ้น ดังในรูปที่ 2.22 พบว่าชี้แกลบที่เริ่มมีโครงสร้างเป็นผลึกเมื่อเผาแกลบที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C [29]

3. อัตราการให้ความร้อน ในกระบวนการเผาแกลบ การให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้อง จะมีผลให้สารอินทรีย์จำพวกเซลลูโลสหรือลิกนินที่อยู่ในแกลบข้าวสลายตัวเป็นคาร์บอนแล้ว คาร์บอนเกิดการออกซิเดชันเป็นแก๊ส ในขณะที่เดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงถึงจุดหลอมเหลวของธาตุมลทินซึ่งส่วนใหญ่เป็น K_2O ธาตุมลทินเหล่านี้จะหลอมเคลือบอยู่บนผิวของชี้แกลบ ถ้าอัตราการให้ความร้อนเร็วเกินไป จะทำให้คาร์บอนเกิดออกซิเดชันออกจากแกลบข้าวไม่หมด แล้วรวมตัวอยู่ใน K_2O ส่งผลให้ชี้แกลบที่ผลิตออกมามีสีดำ [25]

4. ชนิดของกรดที่ใช้สกัดแกลบ กรดที่สามารถสกัดแกลบข้าวได้ดีที่สุดคือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เนื่องจากในแกลบข้าวมีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและโปรตีน เมื่อนำแกลบข้าวไปต้มในกรดเซลลูโลสที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีขนาดเล็กลง ส่วนโปรตีนก็จะสลายกลายเป็นกรดอะมิโนอยู่ในสารละลายกรดใช้สกัดแกลบ และการที่แกลบข้าวมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียออกซิเจนไปในระหว่างการต้มกรดแล้วทำให้สารประกอบคาร์โบเนต (Carbohydrate) เปลี่ยนสีเป็นสีดำ นอกจากนั้นกรดยังสามารถสกัดสารมลทินชนิดอื่นออกจากแกลบข้าวได้ด้วย เช่น โพแทสเซียม อะลูมิเนียม ฟอสฟอรัส แมงกานีส เป็นต้น [25]

5. บรรยากาศที่ใช้ในการเผาแกลบ บรรยากาศที่ใช้ในการเผาแกลบควรมีออกซิเจนมากเพียงพอที่จะทำให้คาร์บอนเกิดออกซิเดชันสลายออกจากแกลบข้าวให้หมด [25]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 ผลการวิเคราะห์หึ่งี่เค้าแกลบด้วยเทคนิค X-ray diffraction โดยที่

Q : Quartz, C : Cristrobalite และ T : Tridymite [29]

2.9.6 การเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบ

จากการศึกษาของ R.V.Krishnarao et al. [25] ได้ศึกษาการเกิดอนุภาคคาร์บอนที่มีในเถ้าซิลิกาจากเถ้าแกลบ พบว่าปริมาณของอนุภาคคาร์บอนที่อยู่ในเถ้าซิลิกาจากการเผาแกลบข้าวที่ไม่ได้ผ่านการต้มด้วยกรด HCl เข้มข้น 3 N จะมีปริมาณสูงกว่าในแกลบข้าวที่ผ่านการต้มกรดและมีแนวโน้มของปริมาณอนุภาคคาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนในการเผาแกลบข้าว ซึ่งการต้มด้วยกรด HCl จะช่วยขจัดอนุภาคคาร์บอนออกไป ในแกลบข้าวจะให้ปริมาณของเถ้าแกลบ 13 – 29 wt.% และจะให้ซิลิกา 87 – 97 wt.% พบว่าการให้อัตราความร้อน 5°C/min ซึ่งเป็นการให้ความร้อนที่ช้าและการเผาที่ 700°C จะให้ปริมาณซิลิกามากที่สุด ในขณะที่การให้ความร้อนแบบทันทีทันใดจะได้เถ้าแกลบที่มีปริมาณซิลิกาน้อยและอนุภาคคาร์บอนจำนวนมาก

จากการศึกษาของ N. Yalcin et al. [26] ได้ศึกษาปริมาณซิลิกาจากแกลบข้าว โดยการต้ม ด้วยกรด HCl และกรด H₂SO₄ นาน 2 h และต้มในสารละลาย NaOH นาน 24 h หลังจากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 600° C ในอากาศ บรรยากาศอาร์กอนและออกซิเจน ทั้งแบบคงที่และแบบภายใต้การไหลของก๊าซ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ปริมาณซิลิกามากที่สุดได้จากการต้มแกลบในกรด HCl ก่อนเผา มี

ขนาดอนุภาค 0.03 – 100 μm โครงสร้างอสังฐาน พื้นที่ผิวจำเพาะ 321 m^2/g เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 0.0045 μm ปริมาตรรูพรุน 4.7297 cm^3/g และซีเมนต์แก้วมีปริมาณซิลิกาสูงถึง 99.66 wt.%

จากการศึกษาของ Tzong – Horn Liou และคณะ [27] ได้ศึกษาการเตรียมและคุณลักษณะของโครงสร้างระดับนาโนของซิลิกาจากแกลบข้าว โดยการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยลักษณะผิวของอนุภาค ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิว ปริมาตรและการกระจายของรูพรุน โดยใช้ TEM, SEM, XRD, FTIR, ICP – MS และ EA ใช้อัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{min}$ พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกา 235 m^2/g เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 5.4 nm และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 60 nm ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน โดยใช้เทคนิค Differential thermal analysis (DTA) กลไกประกอบด้วย 2 สภาวะ โดยสังเกตจากการแตกตัวของความร้อนของแกลบข้าวในอากาศ พลังงานกระตุ้น $166 \pm 10 \text{ KJ}/\text{mol}$ วิธีการนี้เหมาะสำหรับการเตรียมซิลิกาที่สามารถให้พื้นที่ผิวสูง

จากการศึกษาของ Concha Real และคณะ[28] ได้ศึกษาถึงการเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวเริ่มต้นด้วยการนำแกลบข้าวไปต้มด้วยกรด HCl ก่อนที่จะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C จะได้ปริมาณซิลิกาบริสุทธิ์ถึง 99.5 wt.% ด้วยพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 260 m^2/g การตรวจสอบด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งให้เห็นว่าวัสดุมีการกระจายขนาดอนุภาคในระดับ 10^{-9} m อย่างไรก็ตามถ้าการต้มด้วยกรด HCl แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณเถ้าสีขาวที่ได้จากการเผาไหม้แกลบข้าวที่ 600°C ซิลิกามีความบริสุทธิ์สูงแต่พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง 1 m^2/g เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและโพแทสเซียมที่มีอยู่ในแกลบข้าวซึ่งทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ถ้าโพแทสเซียมแคปไซออนไม่ถูกกำจัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C โพแทสเซียมจะมีผลต่อลักษณะพื้นที่ผิวของซิลิกา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 ผงอะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.7 % จาก Ecka Granules ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.2 ผงไทเทเนียมไฮไดรด์ (TiH_2) ความบริสุทธิ์ 99.6 % จาก Sigma Aldrich
- 3.1.3 ขี้เถ้าแกลบจากโรงสีข้าว จ.สระบุรี
- 3.1.4 ผงซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)
- 3.1.5 ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.2 ครกบดสาร
- 3.2.3 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch
- 3.2.4 เครื่องผสมผง โลหะ แบบเขย่า 2 แกน
- 3.2.5 แบบขึ้นรูป Precursor ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm
- 3.2.6 แม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm
- 3.2.7 เตาอบไล่ความชื้น
- 3.2.8 เตาสำหรับอบชิ้นงาน ยี่ห้อ Protherm รุ่น PLF 140/9B
- 3.2.9 เครื่องอัดไฮดรอลิก
- 3.2.10 เครื่องทดสอบพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัด ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-10TE
- 3.2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
- 3.2.12 เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision cutting machine) ยี่ห้อ Buehler รุ่น ISOMET
- 3.2.13 เครื่องขัดชิ้นงาน กระจายทราย และ ผงเพชร สำหรับขัดชิ้นงาน
- 3.2.14 เครื่องสแกนรูป ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น PSC 1402
- 3.2.15 สีสเปรย์ สีดำด้าน
- 3.2.16 เรซินชนิดใส
- 3.2.17 โปรแกรม Image J ใช้ในการวิเคราะห์ภาพ
- 3.2.18 เครื่องตรวจสอบการกระจายและขนาดของอนุภาค ยี่ห้อ MastersizerS
- 3.2.19 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JDX-8030
- 3.2.20 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) ยี่ห้อ WD-XRF รุ่น PW-2400

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมและการตรวจสอบคุณลักษณะของขี้เถ้าแกลบจากแกลบข้าว

3.3.1.1 การชะล้างสิ่งสกปรก

ก่อนเริ่มการทดลองต้องทำการแยกอนุภาคใหญ่ๆที่ไม่ต้องการออกจากแกลบข้าว โดยใช้ตะแกรงร่อนหรืออาจจะคัดแยกด้วยมือ ในกรณีที่ไม่สามารถชะล้างให้ออกหมดได้ หลังจากนั้นจึงนำแกลบข้าวไปล้างกับน้ำสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรกออกไป เช่น เศษดิน แล้วเทน้ำออกให้หมด ก่อนที่จะนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 h

3.3.1.2 การบำบัดด้วยสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการบำบัด คือ กรด HCl เข้มข้น 3N และกรด H_2SO_4 เข้มข้น 10N ในอัตราส่วนกรด 0.5 L ต่อ แกลบข้าว 200 g ใส่แกลบข้าวและสารเคมีลงในบีกเกอร์แล้วต้มที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 h แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 h

3.3.1.3 การเผาแกลบข้าว

นำแกลบข้าวที่ได้จากการบำบัดด้วยสารเคมี ใส่ในถ้วยเหล็กกล้าปลอดสนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm อย่างละ 200 g นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 700°C ที่อัตราการให้ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ แล้วจึงรักษาระดับอุณหภูมิการเผาให้คงที่นาน 3 h จึงปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องภายในเตา จะได้ขี้เถ้าแกลบออกมา

3.3.1.4 การเตรียมผงอนุภาคขี้เถ้าแกลบ

นำขี้เถ้าแกลบมาบดด้วยครกให้ละเอียด จากนั้นจึงนำผงขี้เถ้าแกลบไปคัดขนาดด้วยตะแกรง ร่อนคัดขนาด โดยใช้ตะแกรงเบอร์ 60 , 120 , 400 ตามลำดับ โดยขนาดของช่องว่างตะแกรงร่อนแต่ละเบอร์มีรายละเอียดดังนี้

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

3.3.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาค

3.3.2.1 ตรวจสอบลักษณะของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (scanning electron microscope , SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ในการวิเคราะห์ใช้ทั้งโหมด SE และ โหมด BSE กำหนดขยายขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของขนาดรูปภาพที่ได้ นอกจากนั้นยังมีการใช้โหมด Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) ในการตรวจสอบส่วนประกอบของอนุภาคที่กำลังวิเคราะห์อยู่

3.3.2.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) ใช้เครื่องรุ่น JDX-8030 ซึ่งมี Target เป็น Copper (Cu) และมุมวิเคราะห์ช่วงระหว่าง 10-65 องศา ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 kV, กระแส 40 mA, ความเร็วในการสแกน 0.1 sec/step

3.3.2.3 ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของอนุภาคด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ใช้เครื่อง WD-XRF รุ่น PW-2400 ในการวิเคราะห์ใช้ H_3BO_3 เป็น Binder เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะของอนุภาค

3.3.2.4 การตรวจสอบการกระจายตัวและขนาดของอนุภาค ใช้เครื่อง Particle Size Laser Analyzer ยี่ห้อ MastersizerS ใช้น้ำช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคในเครื่องตรวจสอบการกระจายตัวและขนาดของอนุภาค ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง จากผลการตรวจสอบจะได้ค่า D_{10} , D_{50} , D_{90} และ Mean diameter (μm) ออกมา

3.3.3 การผลิต Precursor และโฟมอะลูมิเนียม

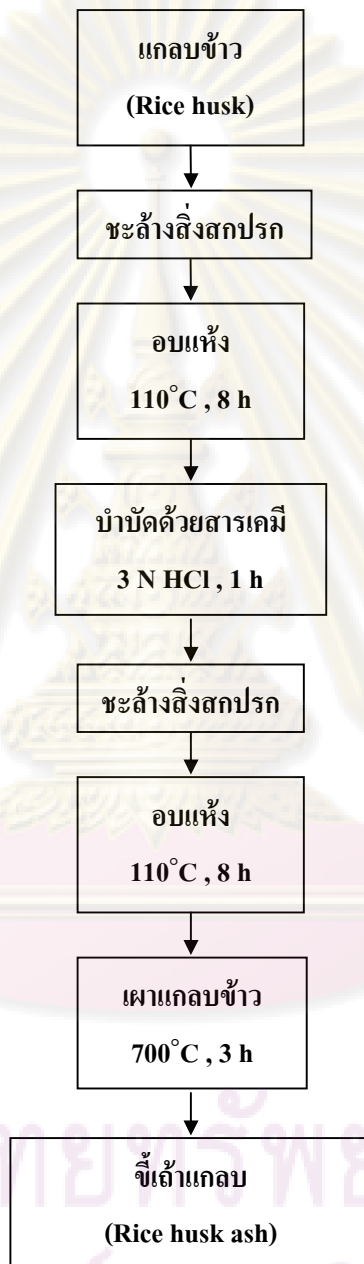
3.3.3.1 การผลิต Precursor

ผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับ TiH_2 0.6 wt.% และซีเมนต์เคลือบ 1 , 2 , 3 wt.% โดยใช้เครื่องผสมเป็นเวลา 30 min จากนั้นนำผงที่ผสมเรียบร้อยแล้วจำนวน 10 g ไปอัดขึ้นรูปโดยใส่ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (die) ที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเคลือบด้วยลิเทียมสเตียเรท (Lithium stearate) ใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูป 650 MPa เพื่อให้ได้ Precursor ที่มีความหนาแน่นทางทฤษฎีสูงกว่า 99 %

3.3.3.2 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

นำ Precursor ที่ได้ใส่ลงในแม่พิมพ์หล่อที่เคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์ (Boron nitride) แล้วนำไปให้ความร้อนในเตาที่มีการตั้งอุณหภูมิ $800^{\circ}C$ ไว้ล่วงหน้าโดยใช้เวลาในการให้ความร้อนต่างกันช่วงละ 15 s โดยเริ่มนำชิ้นงานออกจากเตาชิ้นแรกที่เวลา 5 min และชิ้นสุดท้ายที่เวลา 7 min

เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตาแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ จากนั้นจึงนำไปวัดความหนาแน่นของโพมอะลูมิเนียมที่ได้



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมขี้เถ้าแกลบจากแกลบข้าว

3.3.4 การวัดความหนาแน่นของ Precursor และ โฟมอะลูมิเนียม

การวัดความหนาแน่นของ Precursor ทำได้โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดขนาดของ Precursor เพื่อคำนวณหาปริมาตรของ Precursor จากนั้นนำ Precursor ไปชั่งเพื่อหาน้ำหนัก น้ำหนักและปริมาตรของ Precursor มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นตามสมการ (1)

$$D_{precursor} = \frac{m_{precursor}}{V_{precursor}} \quad (1)$$

โดยที่

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

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

การวัดความหนาแน่นของ โฟมอะลูมิเนียม จะใช้โฟม 1 ชิ้นงานเป็นตัวแทนของ ส่วนผสมนั้นๆ เนื่องจากความหนาแน่นของ โฟมที่ผลิตได้สามารถควบคุมได้ยาก การวัดความหนาแน่นของ โฟมจะใช้วิธี Archimedes' densitometry ดังสมการ (2)

$$D_{foam} = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \quad (2)$$

โดยที่

$$W_{air} = \text{น้ำหนักของ โฟม ในอากาศ (g)}$$

$$W_{water} = \text{น้ำหนักของ โฟม ในน้ำ (g)}$$

การหาการขยายตัวของ โฟมอะลูมิเนียมสามารถหาได้จากสมการ (3)

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

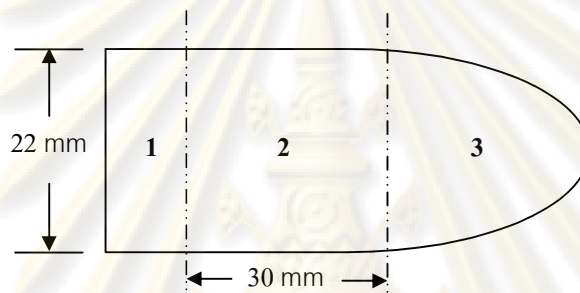
โดยที่

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

$$V_{foam} = \text{ปริมาตรของ โฟม (cm}^3\text{)}$$

3.3.5 การทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

เนื่องจากกระบวนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมสามารถควบคุมความหนาแน่นของโฟมที่ผลิตได้ยาก ในการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดจะควบคุมความหนาแน่นของโฟมให้อยู่ในช่วง $0.6 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ จึงใช้โฟม 1 ชิ้นงานเป็นตัวแทนของโฟมส่วนผสมนั้นๆ การเตรียมชิ้นงานทดสอบเริ่มจากนำโฟมไปตัดด้วยเครื่อง Precision cutting machine ในทิศทางดังรูปที่ 3.1 นำโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านการตัดแล้วในส่วนที่ 2 ไปหาความหนาแน่นของโฟม ถ้าโฟมมีความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่กำหนด นำไปทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดโดยใช้อัตราการเพิ่มความเครียดเท่ากับ 5 mm/min ถึง 60% ของความเครียด



รูปที่ 3.2 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโฟมอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง Precision Cutting Machine

เมื่อได้ผลการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม คือ

- ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นที่จุดตัดระหว่างกราฟจากผลการทดสอบแรงอัดกับเส้นตรงขนานเส้นกราฟช่วงแรก โดยตัดแกนที่ 0.2% ของค่าความเครียด มีหน่วยเป็น MPa
- ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption, E) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด สามารถหาได้จากสมการ (4) โดยมีหน่วยเป็น MJ/cm^3

$$E = \int_0^{\epsilon_u} \sigma \cdot \epsilon \cdot d\epsilon \quad (4)$$

โดยที่ σ = ความเค้น (MPa)
 ϵ = ความเครียด

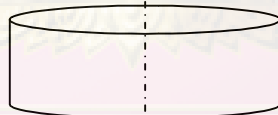
- ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption efficiency, η) เป็นค่าที่หาได้จากสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเทียบกับพื้นที่สี่เหลี่ยมของกราฟ ณ จุดสิ้นสุดของเส้นกราฟ ดังสมการ (5)

$$\eta = \frac{E}{\sigma \cdot \varepsilon} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_a}, 0 < \varepsilon_a \leq 1 \quad (5)$$

โดยที่ E = ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (MJ/cm³)

3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Precursor และโพลีอะลูมิเนียม

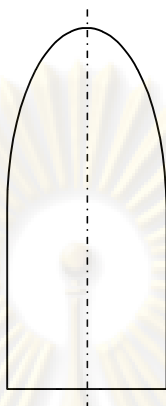
นำ Precursor ไปตัดด้วยเครื่อง Precision cutting machine ตามทิศทางในรูปที่ 3.2 จากนั้น นำ Precursor และโพลีอะลูมิเนียมในส่วนที่ 1 และ 3 (ในรูปที่ 3.1) ไปทำการขึ้นรูปตัวเรือนแบบเย็น (Cold mounting) โดยใช้เรซินใส เพื่อเตรียมสำหรับขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้าง นำ Precursor และโพลีอะลูมิเนียมที่ทำการ Mount แล้วไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200 , 400 , 600 , 800 , 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6 , 3 , 1 μm แล้วจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดแล้วไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และ SEM



รูปที่ 3.3 ทิศทางที่ใช้ในการตัด Precursor

3.3.7 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียม

สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคภายในของโพลีอะลูมิเนียม สามารถทำได้โดยการตัดโพลีอะลูมิเนียมในแนวตั้งฉากกับฐานของโพลีด้วยเครื่อง Discharge wire cut machine ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นนำชิ้นส่วนโพลีอะลูมิเนียมที่ตัดแล้ว ไปพ่นสเปรย์สีดำ เมื่อรอให้สีแห้งแล้ว นำไปขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้เกิดความคมชัดของโครงสร้าง สแกนโครงสร้างโพลีด้วยเครื่องสแกนรูปที่ความละเอียด 1200 dpi



รูปที่ 3.4 ทิศทางที่ใช้ในการตัดโคมอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง Discharge wire cut Machine

การวิเคราะห์รูปด้วยโปรแกรม Image J เป็นการวิเคราะห์ที่สามารถบอกค่าสมบัติต่างๆของโครงสร้างโคมออกมาเป็นค่าเชิงปริมาณได้ เช่น ขนาดของโพรงอากาศ ค่าสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโคมอะลูมิเนียม เป็นต้น

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของปริมาณ ขนาดและประเภทของอนุภาคซีเถ้าเคลือบในโคมอะลูมิเนียมต่อพฤติกรรมการขยายตัว โครงสร้างและพฤติกรรมการรับแรงอัดของโคมอะลูมิเนียม โดยมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลต่างๆกับโคมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบจากโรงไฟฟ้า โคมที่ผสมอนุภาคซิลิกาและโคมที่ผสมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ในการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของโคม จะมีการใช้โปรแกรม Image J เพื่อวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของโพรงอากาศภายในโครงสร้างของโคม และมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของโคมกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของโคมอะลูมิเนียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

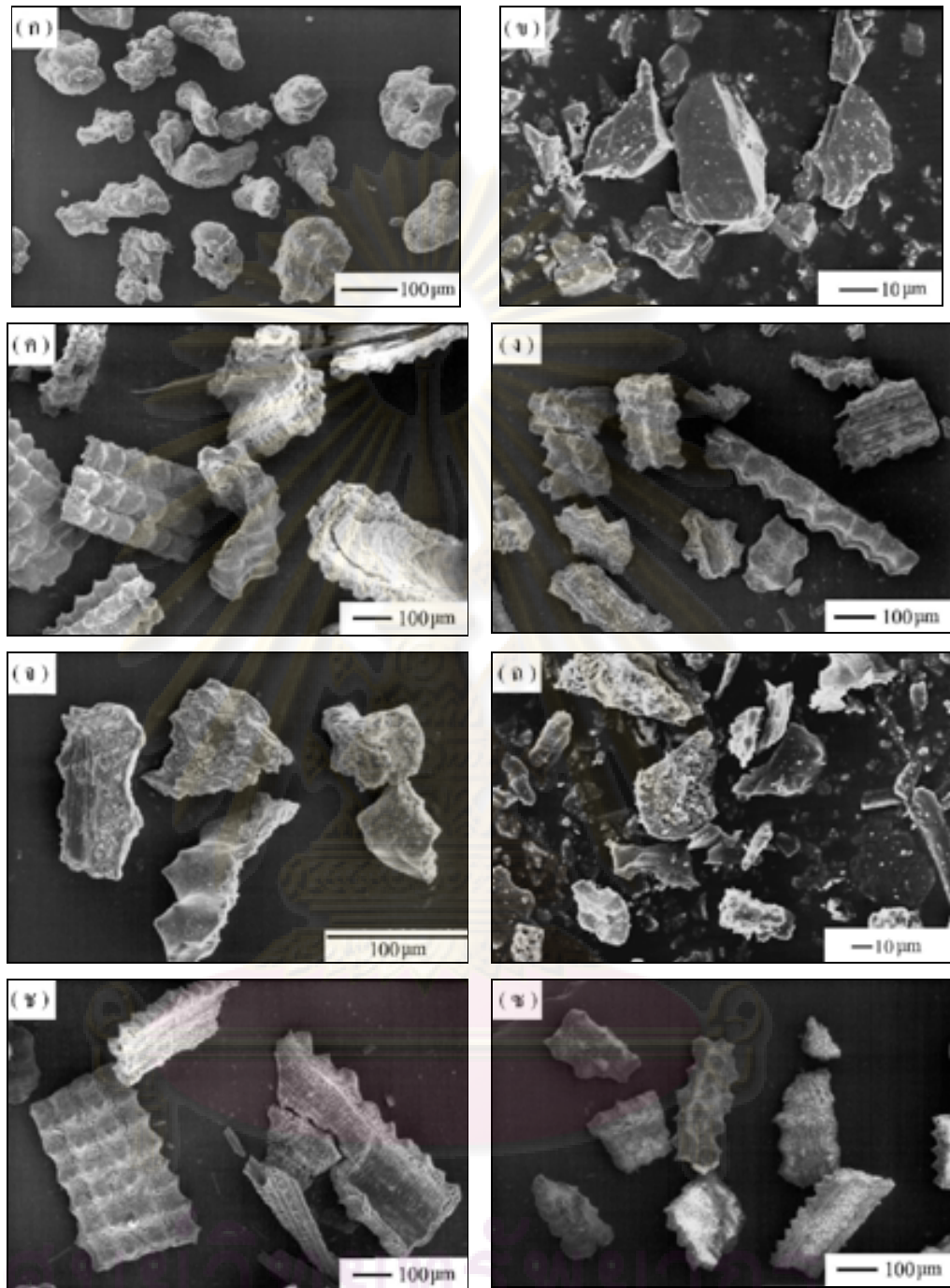
บทที่ 4

ผลการทดลอง

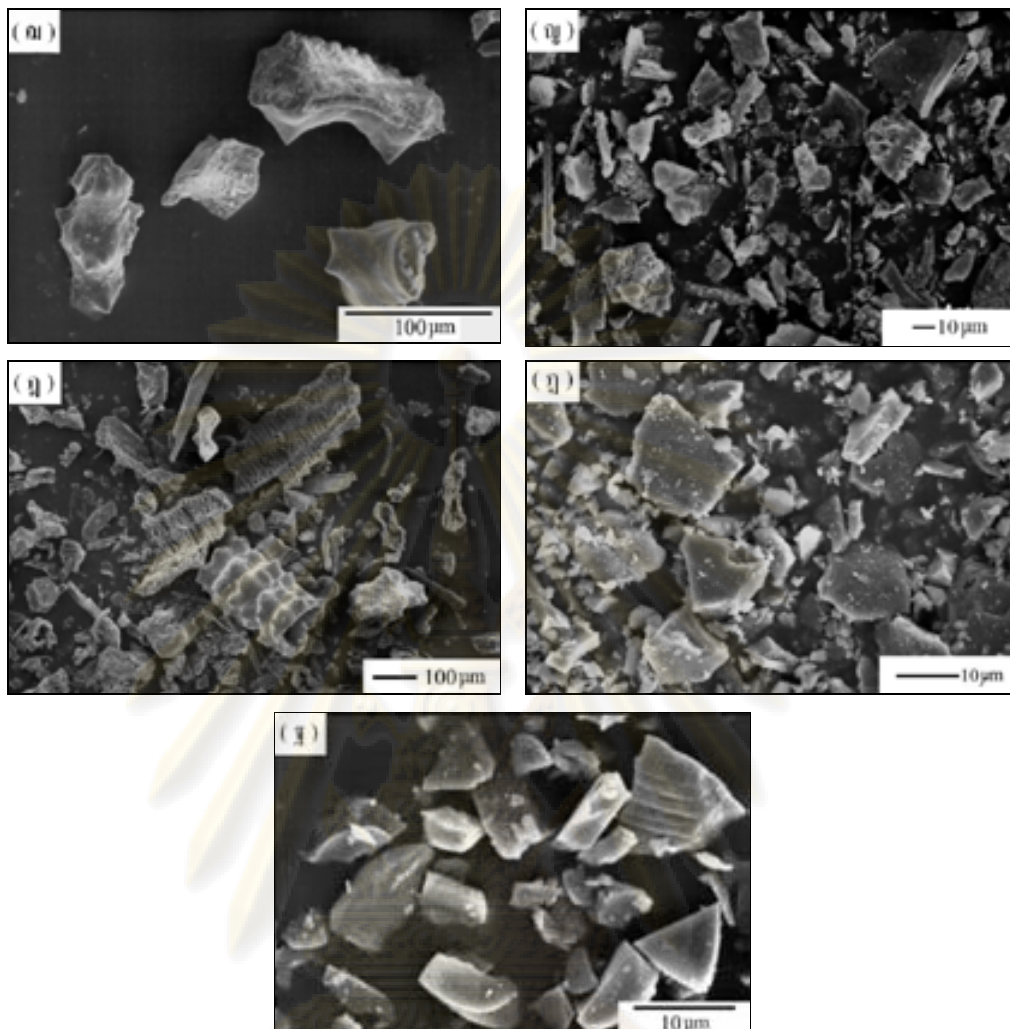
4.1 คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุผง

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวัสดุผง และตารางที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุผง จากรูปที่ 4.1(ก) ผงอะลูมิเนียมมีการกระจายของขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 108 μm และมีรูปร่างของผงไม่แน่นอน (Irregular) ส่วนในรูปที่ 4.1(ข) ผงไททาเนียมไฮดรอกไซด์ มีรูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมและมุม (Angular) ในขณะที่อนุภาคของซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl (รูปที่ 4.1(ค-จ)) ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 364, 199, 80, 18 μm ตามลำดับ มีรูปร่างอนุภาคลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) โดยมีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันสองด้าน ซึ่งด้านในมีลักษณะเรียบ ส่วนด้านนอกมีลักษณะขรุขระเป็นปุ่มหรือลอนที่สม่ำเสมอตลอดทั้งผิว รูปที่ 4.1(ข-ญ) ซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 401, 210, 75, 16 μm ตามลำดับ รูปร่างอนุภาคเป็นเกล็ดที่มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันสองด้าน ด้านในเรียบและด้านนอกมีลักษณะขรุขระคล้ายซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยกรด HCl แต่มีความขรุขระน้อยกว่า ในรูปที่ 4.1(ฎ) ซีเมนต์จากโรงไฟฟ้า มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแตกต่างกันมาก ขนาดเฉลี่ยประมาณ 180 μm มีรูปร่างอนุภาคเป็นเกล็ด มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันทั้งสองด้าน ด้านในมีลักษณะขรุขระน้อยกว่าผิวด้านนอก ซึ่งคล้ายคลึงกับซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 ส่วนรูปที่ 4.1(ฏ) ผงซิลิกา มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 5 μm มีรูปร่างอนุภาคเป็นเหลี่ยม และรูปที่ 4.1(ฐ) ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 7 μm มีรูปร่างอนุภาคเป็นเหลี่ยม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของวัสดุผง (ก) อะลูมิเนียม (จ) โทเทเนียมไฮไดรด์ (ค) ซี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 364 μm (ง) ซี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 199 μm (ฉ) ซี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 81 μm (ฉ) ซี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 18 μm (ช) ซี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย 401 μm (ซ) ซี้เถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย 210 μm



รูปที่ 4.1 (ต่อ) ลักษณะรูปร่างของวัสดุผง (ด) ซึ่ได้แก่กลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย $75 \mu m$ (ง) ซึ่ได้แก่กลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย $16 \mu m$ (ฉ) ซึ่ได้แก่กลบจากโรงไฟฟ้า (ช) ผงซิลิกา (ค) ผงซิลิกอนคาร์ไบด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| Powder | D₁₀ (μm) | D₅₀ (μm) | D₉₀ (μm) | Mean diameter (μm) |
|---|--|--|--|---|
| Al | 45.6 | 101.6 | 184.1 | 108.4 |
| RHA [HCl] 1 | 154.42 | 355.00 | 603.78 | 364.34 |
| RHA [HCl] 2 | 3.03 | 197.62 | 356.52 | 199.58 |
| RHA [HCl] 3 | 0.08 | 74.36 | 162.38 | 80.91 |
| RHA [HCl] 4 | 0.06 | 11.85 | 47.11 | 18.13 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 1 | 171.39 | 399.06 | 649.37 | 401.41 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 2 | 0.18 | 214.19 | 378.40 | 210.77 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 3 | 0.07 | 67.61 | 162.03 | 75.09 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 4 | 0.06 | 9.74 | 41.18 | 15.55 |
| RHA [power plant] | 0.10 | 131.93 | 424.14 | 179.56 |
| SiO ₂ | 0.06 | 0.1 | 19.78 | 5.38 |
| SiC | 2.67 | 6.22 | 11.81 | 7.11 |

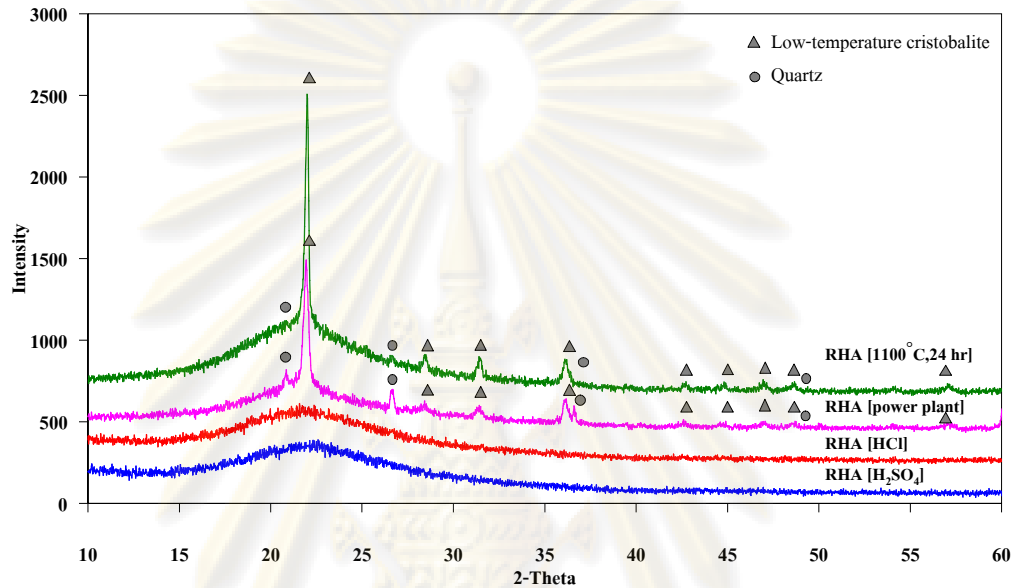
ตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุผง

4.2 คุณลักษณะของซีเมนต์

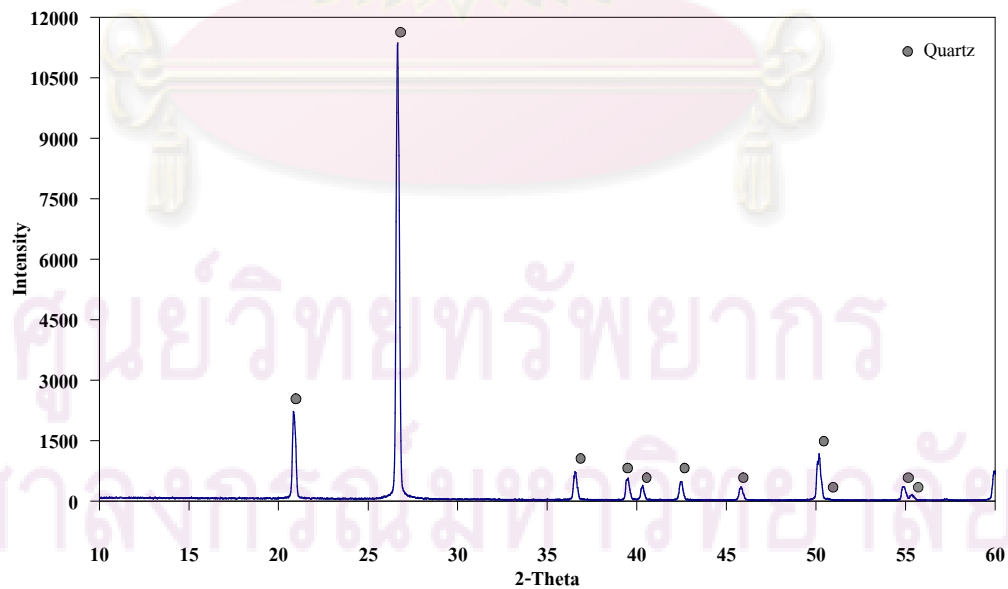
4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของซีเมนต์ (รูปที่ 4.2) ทั้งซีเมนต์ที่สกัดด้วยกรด HCl และกรด H₂SO₄ แสดงให้เห็นลักษณะอะมอร์ฟัสของซิลิกา (Amorphous silica) ในช่วงมุม 2-Theta ตั้งแต่ 15 – 35 เป็นยอดกว้าง (Broad peak) และมียอดกราฟสูงสุดอยู่ที่ 22.5 องศา ส่วนซีเมนต์จากโรงไฟฟ้าแสดงให้เห็นโครงสร้างผลึกของซิลิกา (Crystalline silica) แบบ

Low-temperature cristobalite และ Quartz สำหรับซีเมนต์แกลบที่สกัดด้วยกรด HCl ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เวลา 24 ชม. แสดงให้เห็นโครงสร้างผลึกของซิลิกาแบบ Low-temperature cristobalite และ Quartz เช่นกัน ส่วนในรูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของผงซิลิกา พบว่าผงซิลิกามีโครงสร้างผลึกแบบ Quartz



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ซีเมนต์แกลบ



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ผงซิลิกา

4.2.2 การหาส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบ

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบในขี้เถ้าแกลบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าขี้เถ้าแกลบได้จากการสกัดด้วยกรด 3 mol HCl และเผาที่ 700°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min ได้ปริมาณซิลิกา (SiO₂) บริสุทธิ์ ประมาณ 99.71 wt.% และมีสารเจือปน (Impurity) ได้แก่ Al₂O₃, SO₃, K₂O, CaO และ Fe₂O₃ ดังตารางที่ 4.2

ส่วนขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการสกัดด้วยกรด H₂SO₄ เข้มข้น 10% โดยปริมาตร และเผาที่ 700°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min ได้ปริมาณซิลิกา (SiO₂) บริสุทธิ์ ประมาณ 99.61 wt.% และมีสารเจือปน (Impurity) ได้แก่ MgO, Al₂O₃, P₂O₅, SO₃, K₂O, CaO และ Fe₂O₃ ดังตารางที่ 4.2

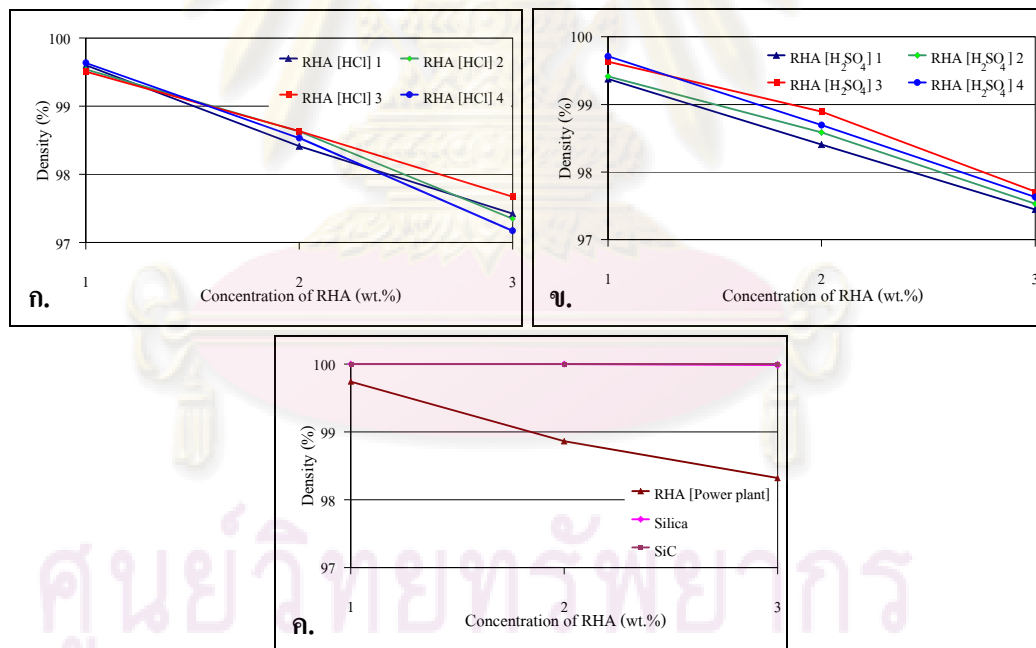
สำหรับขี้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า ได้ปริมาณซิลิกา (SiO₂) บริสุทธิ์ ประมาณ 94.88 wt.% และมีสารเจือปน (Impurity) ได้แก่ Na₂O, MgO, Al₂O₃, P₂O₅, SO₃, Cl, K₂O, CaO, TiO₂, MnO₂, Fe₂O₃, CuO และ ZnO ดังตารางที่ 4.2

| ชนิดสารประกอบ | RHA [HCl] | RHA [H ₂ SO ₄] | RHA [Power plant] |
|--------------------------------|-----------|---------------------------------------|-------------------|
| Na ₂ O | - | - | 0.097 |
| MgO | - | 0.02 | 0.409 |
| Al ₂ O ₃ | 0.174 | 0.064 | 0.266 |
| SiO ₂ | 99.715 | 99.609 | 94.876 |
| P ₂ O ₅ | - | 0.035 | 1.077 |
| SO ₃ | 0.043 | 0.114 | 0.07 |
| Cl | - | - | 0.045 |
| K ₂ O | 0.011 | 0.015 | 1.952 |
| CaO | 0.045 | 0.107 | 0.744 |
| TiO ₂ | - | - | 0.017 |
| MnO ₂ | - | - | 0.178 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.012 | 0.035 | 0.25 |
| CuO | - | - | 0.005 |
| ZnO | - | - | 0.013 |

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบ

4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดของผงโลหะ (Precursor density)

ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดที่ผสมซีเถ้าเคลือบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และ H_2SO_4 (รูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข) ตามลำดับ) ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดที่ผสมซีเถ้าเคลือบที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันทั้ง 4 ขนาด มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ เมื่อปริมาณของซีเถ้าเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3 wt.% ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดมีค่าลดลง โดยค่าความหนาแน่นยังคงมีค่ามากกว่า 97% ส่วนในรูปที่ 4.4(ค) แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดที่ผสมซีเถ้าเคลือบจากโรงไฟฟ้า ซิลิกา และซิลิกอนคาร์ไบด์ สำหรับชิ้นงานที่ผสมซีเถ้าเคลือบจากโรงไฟฟ้า เมื่อปริมาณซีเถ้าเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3 wt.% ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดมีแนวโน้มลดลง แต่การลดลงของค่าความหนาแน่นลดลงน้อยกว่าชิ้นงานที่ผสมซีเถ้าเคลือบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และ H_2SO_4 ส่วนชิ้นงานที่ผสมซิลิกา เมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3 wt.% ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดมีค่าลดลงเล็กน้อย และสำหรับชิ้นงานที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3 wt.%

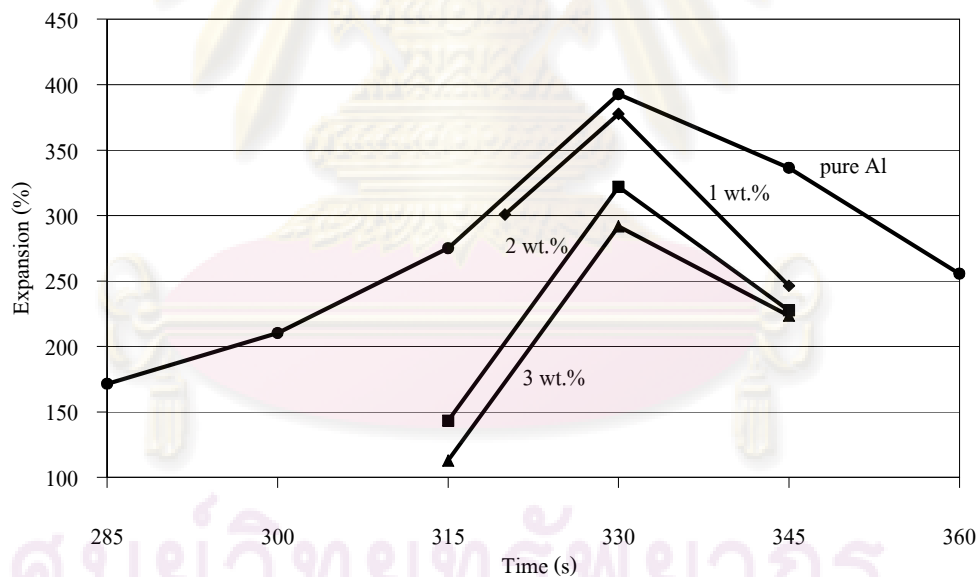


รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัดกับปริมาณอนุภาคเซรามิก (ก.) ซีเถ้าเคลือบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl (ข.) ซีเถ้าเคลือบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 (ค.) ซีเถ้าเคลือบจากโรงไฟฟ้าซิลิกาและซิลิกอนคาร์ไบด์

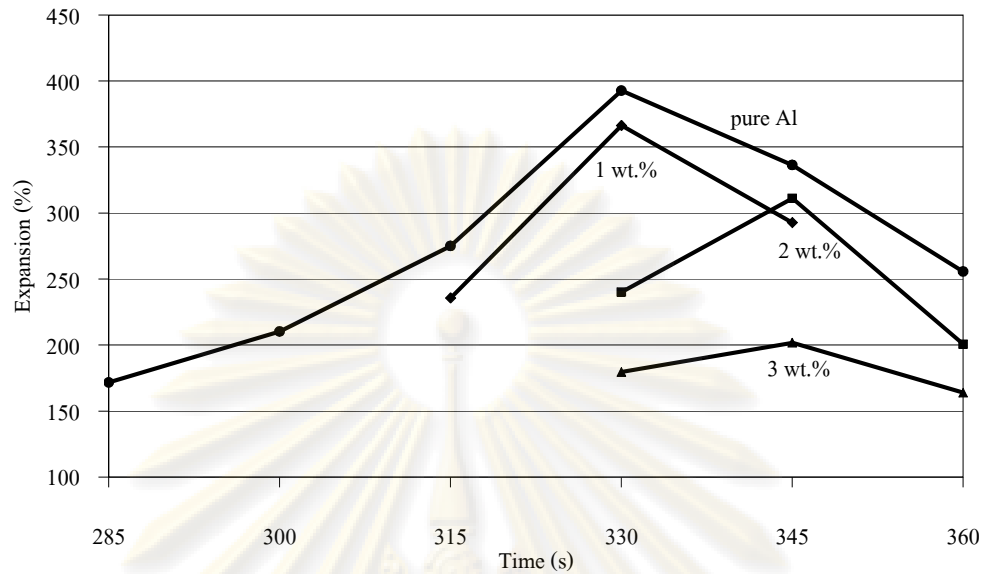
4.4 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียม (Foam expansion)

จากรูปที่ 4.5 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลาที่ใช้ในการผลิตโฟม พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นและมีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 393% เมื่อเวลาผ่านไป 330 s หลังจากนั้นโฟมเกิดการยุบตัวลง เพราะเกิดการพังตัวภายในโครงสร้างโฟมเนื่องจากการเกิดการไหลตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานโฟมเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

สำหรับโฟมที่ผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl มีขนาดเฉลี่ย 364 μm พบว่าเมื่อปริมาณของซีลีเนียมเพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3 wt.% การขยายตัวสูงสุดของโฟมลดลงตามลำดับ โดยโฟมที่ผสมซีลีเนียม 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 378% แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่าการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียม และโฟมที่ผสมซีลีเนียม 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 292% โดยโฟมทั้ง 3 ส่วนผสมมีอัตราการขยายตัวก่อนถึงจุดสูงสุดใกล้เคียงกัน เมื่อถึงจุดสูงสุดของการขยายตัวแล้วเกิดการพังตัวของโครงสร้างโฟมขึ้นอย่างรวดเร็ว

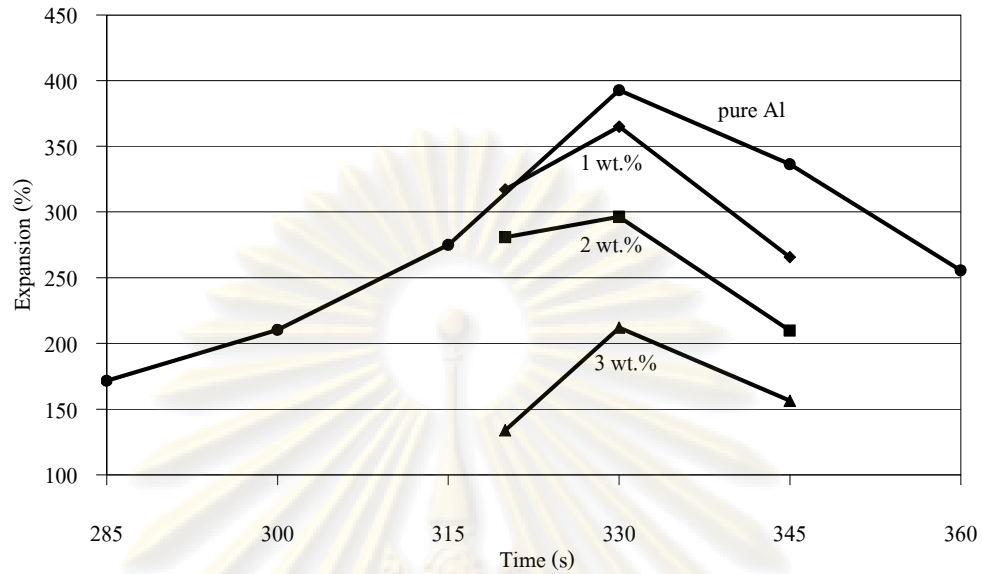


รูปที่ 4.5 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโฟมที่ผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 364 μm



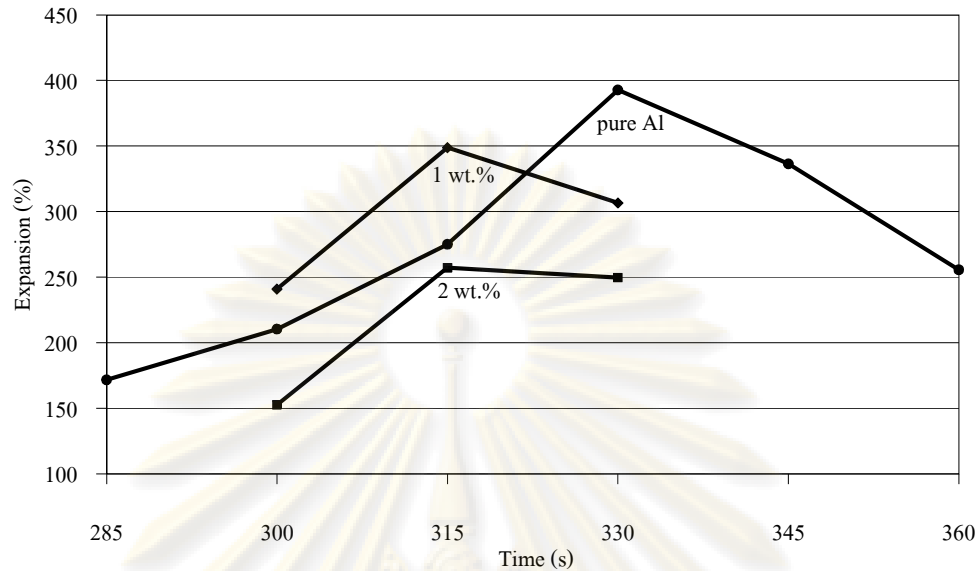
รูปที่ 4.6 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโฟมที่ผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 199 μm

รูปที่ 4.6 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดกรด HCl โดยมีขนาดเฉลี่ย 199 μm กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโฟม เมื่อปริมาณซีลีเนียมเพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3 wt.% การขยายตัวสูงสุดของโฟมลดลงตามลำดับ โดยโฟมที่ผสมซีลีเนียม 1 wt.% มีอัตราการขยายตัวสูงสุด และมีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 366% ที่เวลา 330 s ซึ่งยังมีค่าน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียม และสำหรับโฟมที่ผสมซีลีเนียม 2 wt.% และ 3 wt.% โฟมมีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 345 s โดยโฟมที่ผสมซีลีเนียม 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 202% และอัตราการขยายตัวของโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีลีเนียมเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการพังตัวของโฟมยังคงใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีลีเนียมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโฟมที่ผสมซีเถ้าเคลือบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 80 μm

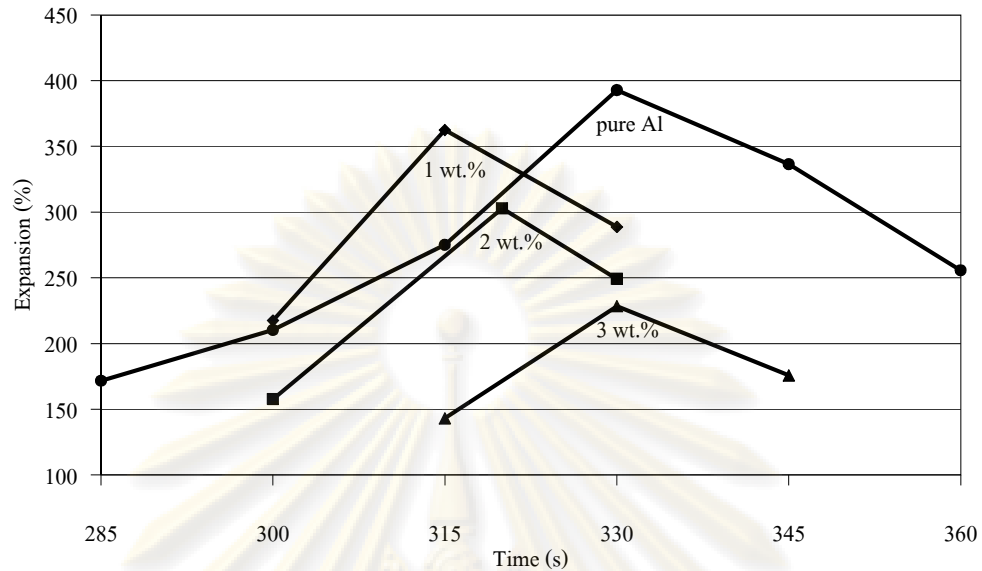
รูปที่ 4.7 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเถ้าเคลือบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl โดยมีขนาดเฉลี่ย 80 μm กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโฟม พบว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าเคลือบทั้ง 3 ส่วนผสมเกิดการขยายตัวสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไป 330 s โดยโฟมที่ผสมซีเถ้าเคลือบทั้ง 3 ส่วนผสมขยายตัวสูงสุด เท่ากับ 365% แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่าการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียม ส่วนโฟมที่ผสมซีเถ้าเคลือบ 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 212% และการขยายตัวสูงสุดของโฟมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีเถ้าเคลือบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 การขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโพมที่ผสมซีเอ็นแอลที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ขนาดเฉลี่ย 18 μm

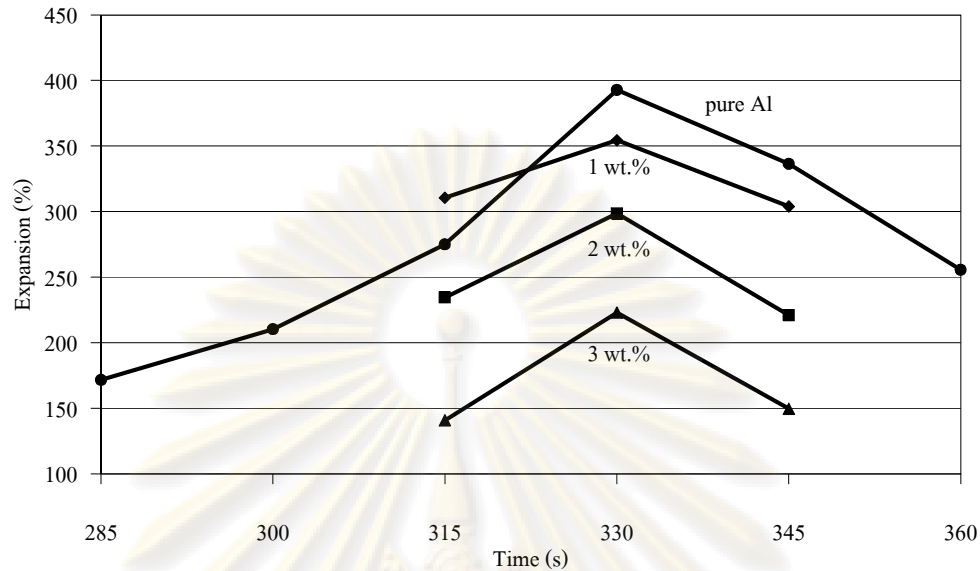
รูปที่ 4.8 แสดงการขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมผสมซีเอ็นแอลที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl โดยมีขนาดเฉลี่ย 18 μm กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโพม พบว่าเมื่อปริมาณซีเอ็นแอลเพิ่มขึ้นการขยายตัวสูงสุดของโพมมีแนวโน้มลดลงและพบว่าไม่เกิดการขยายตัวขึ้นในโพมที่ผสมซีเอ็นแอล 3 wt.% โดยโพมที่ผสมซีเอ็นแอลทั้ง 1 wt.% และ 2 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด เมื่อเวลาผ่านไป 315 s ซึ่งใช้เวลาในการขยายตัวถึงจุดสูงสุดน้อยกว่าโพมอะลูมิเนียม โดยโพมที่ผสมซีเอ็นแอล 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด เท่ากับ 349% แต่ยังคงมีค่าการขยายตัวสูงสุดน้อยกว่าโพมอะลูมิเนียม ส่วนอัตราการขยายตัวก่อนถึงจุดสูงสุดของโพมที่ผสมซีเอ็นแอล 1 wt.% และ 2 wt.% มีอัตราการขยายตัวใกล้เคียงกันและอัตราการพังตัวของโพมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีเอ็นแอลเพิ่มขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



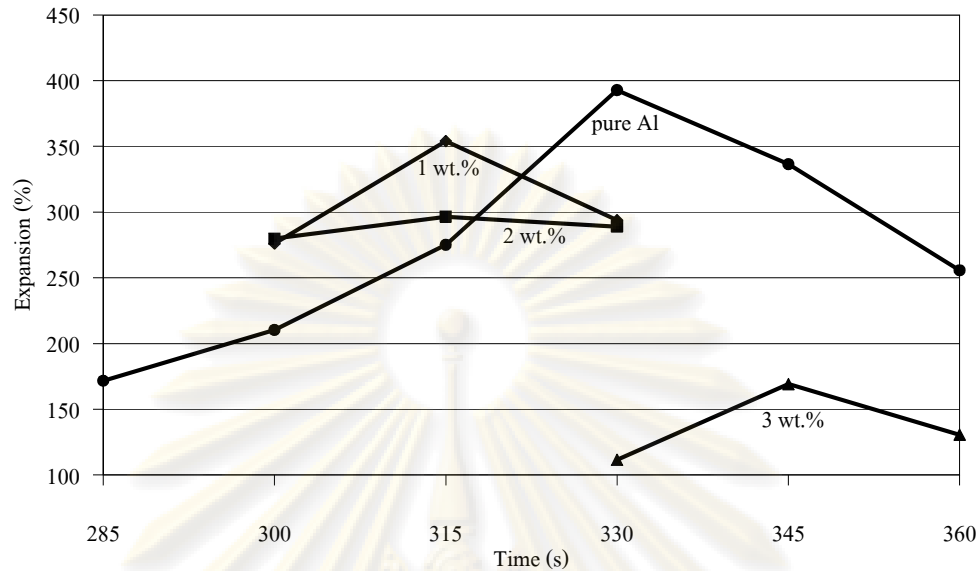
รูปที่ 4.9 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของ โฟมที่ผสมซีเอ็นเอกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย $401 \mu m$

รูปที่ 4.9 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเอ็นเอกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 โดยมีขนาดเฉลี่ย $401 \mu m$ พบว่าเมื่อปริมาณซีเอ็นเอกลบเพิ่มขึ้นการขยายตัวสูงสุดของโฟมมีแนวโน้มลดลง โดยที่โฟมผสมซีเอ็นเอกลบ 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 363% ที่เวลา 315 s ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียม ส่วนโฟมที่ผสมซีเอ็นเอกลบ 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 228% ที่เวลา 330 s ส่วนแนวโน้มของอัตราการขยายตัวและอัตราการพังตัวของโฟมยังคงใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณซีเอ็นเอกลบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโฟมที่ผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย $210 \mu m$

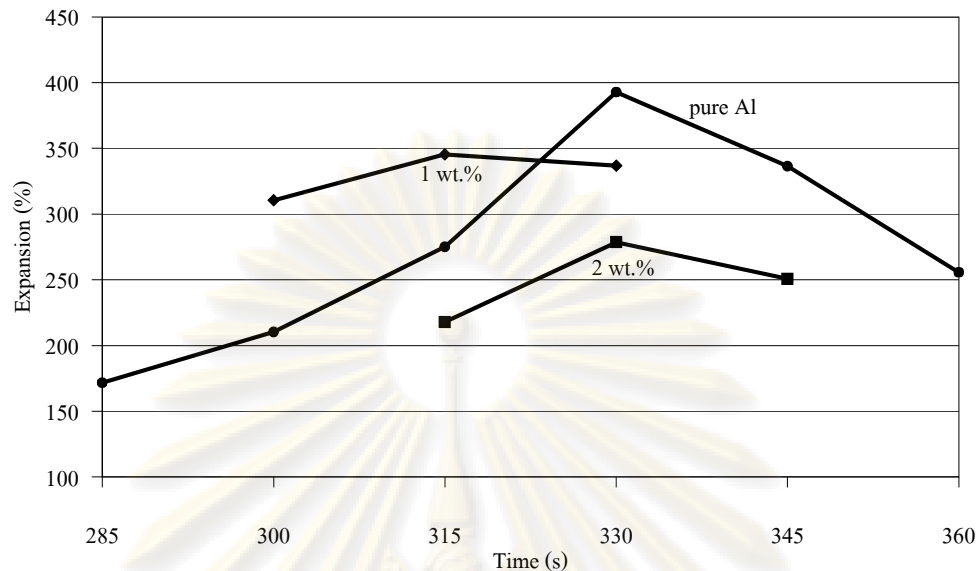
รูปที่ 4.10 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 มีขนาดเฉลี่ย $210 \mu m$ กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโฟม พบว่าโฟมที่ผสมซีลีเนียมทุกส่วนผสมมีการขยายตัวสูงที่สุดที่เวลา 330 s โดยโฟมที่ผสมซีลีเนียม 1 wt.% มีการขยายตัวสูงที่สุด เท่ากับ 354% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการขยายตัวสูงที่สุดของโฟมอะลูมิเนียม เมื่อปริมาณของซีลีเนียมเพิ่มขึ้นการขยายตัวสูงที่สุดของโฟมมีแนวโน้มลดลง โดยโฟมที่ผสมซีลีเนียม 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 228% ส่วนอัตราการขยายตัวและอัตราการพังตัวของโฟมมีแนวโน้มใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณของซีลีเนียมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 การขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมเทียบกับเวลา ของโพมที่ผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย $75 \mu m$

รูปที่ 4.11 แสดงการขยายตัวของโพมอะลูมิเนียมผสมซีลีเนียมที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 มีขนาดเฉลี่ย $75 \mu m$ กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโพม พบว่าการขยายตัวสูงสุดของโพมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของซีลีเนียมเพิ่มขึ้น โดยโพมที่ผสมซีลีเนียม 1 wt.% มีการขยายตัวสูงที่สุดเท่ากับ 354% ที่เวลา 315 s ส่วนโพมที่ผสมซีลีเนียม 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 169% ที่เวลา 345 s ซึ่งเป็นโพมที่ใช้เวลาในการขยายตัวมากกว่าโพมอะลูมิเนียม ส่วนโพมที่ผสมซีลีเนียม 2 wt.% มีทั้งอัตราการขยายตัวและอัตราการพังตัวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโพมส่วนผสมอื่น

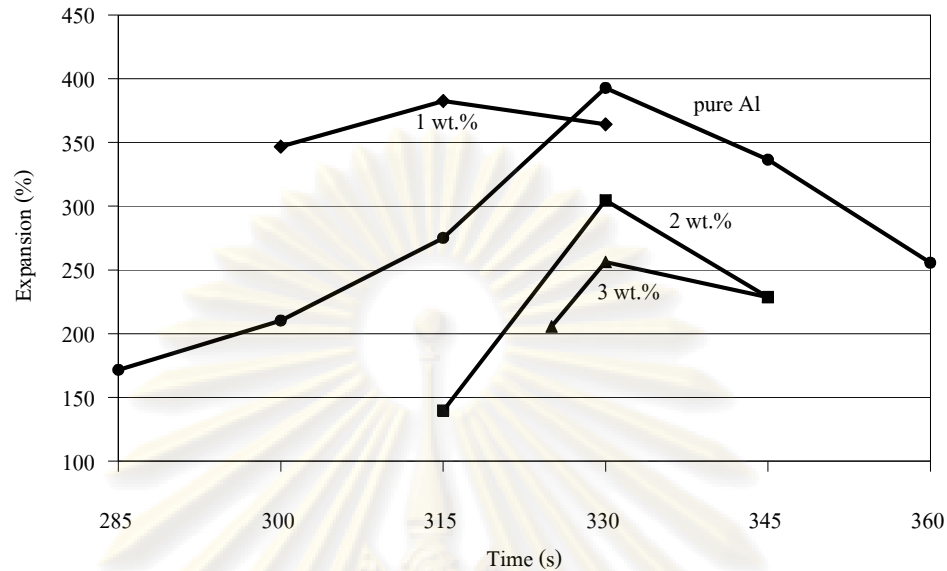
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโฟมที่ผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย $16 \mu m$

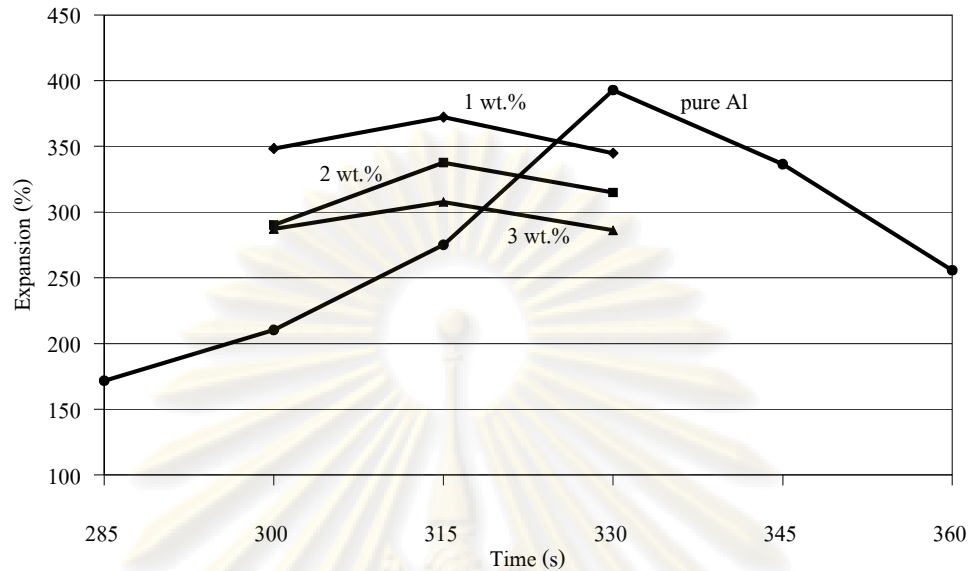
รูปที่ 4.12 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ขนาดเฉลี่ย $16 \mu m$ กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโฟม พบว่าเมื่อปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้น การขยายตัวสูงสุดของโฟมมีแนวโน้มลดลง โดยโฟมที่ผสมซีเมนต์ 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 345% ที่เวลา 315 s และไม่พบการขยายตัวขึ้นในโฟมที่ผสมซีเมนต์ 3 wt.% สำหรับอัตราการขยายตัวและอัตราการฟุ้งตัวของโฟมที่ผสมซีเมนต์นั้น มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีค่าน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



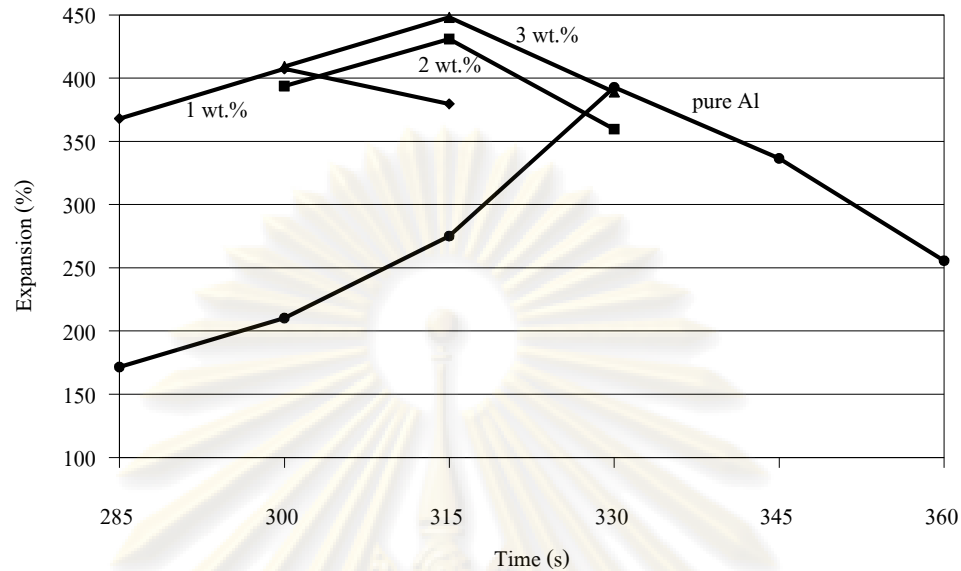
รูปที่ 4.13 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโฟมที่ผสมซีเมนต์จากโรงงานไฟฟ้า ขนาดเฉลี่ย 180 μm

ในรูปที่ 4.13 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ที่ได้จากโรงงานไฟฟ้า มีขนาดเฉลี่ย 180 μm กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโฟม พบว่าเมื่อปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้น การขยายตัวสูงสุดของโฟมมีแนวโน้มลดลง โดยโฟมที่ผสมซีเมนต์ 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุด เท่ากับ 382% ที่เวลา 315 s แต่การขยายตัวสูงสุดยังคงมีค่าน้อยกว่าการขยายตัวสูงสุดของโฟมอะลูมิเนียม ส่วนโฟมที่ผสมซีเมนต์ 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 256% ที่เวลา 330 s นอกจากนี้โฟมที่ผสมซีเมนต์ 1 wt.% ยังมีอัตราการขยายตัวและอัตราการพังตัวต่ำกว่าโฟมอะลูมิเนียม ส่วนโฟมที่ผสมซีเมนต์ 2 wt.% มีอัตราการขยายตัวและอัตราการพังตัวของโฟมสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียม และสำหรับโฟมที่ผสมซีเมนต์ 3 wt.% มีอัตราการขยายตัวสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียม แต่มีอัตราการพังตัวต่ำกว่าโฟมอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.14 การขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมกับเวลา ของโฟมที่ผสมซิลิกา ขนาดเฉลี่ย 5 μm

ในรูปที่ 4.14 แสดงการขยายตัวของโฟมอะลูมิเนียมผสมซิลิกา ขนาดเฉลี่ย 5 μm กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโฟม พบว่าโฟมทั้ง 3 ส่วนผสมมีการขยายตัวสูงสุดที่เวลา 315 s ซึ่งใช้เวลาในการขยายตัวถึงจุดสูงสุดน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียม เมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นการขยายตัวสูงสุดของโฟมมีแนวโน้มลดลง โดยที่โฟมผสมซิลิกา 1 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 372% และโฟมที่ผสมซิลิกา 3 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 307% และสำหรับอัตราการขยายตัวของโฟมที่ผสมซิลิกาทั้ง 3 ส่วนผสมมีค่าน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียม โดยโฟมที่ผสมซิลิกา 2 wt.% มีอัตราการขยายตัวมากกว่า 1 wt.% และ 3 wt.% ส่วนอัตราการพองตัวของโฟมที่ผสมซิลิกามีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ส่วนผสม แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่าอัตราการพองตัวของโฟมอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.15 การขยายตัวของโคมอะลูมิเนียมเทียบกับเวลาของโคมที่ผสมซิงก์ออกไซด์
ขนาดเฉลี่ย 7 μm

รูปที่ 4.15 แสดงการขยายตัวของโคมอะลูมิเนียมผสมซิงก์ออกไซด์ มีขนาดเฉลี่ย 7 μm กับเวลาที่ใช้ในการผลิตโคม พบว่าเมื่อปริมาณของซิงก์ออกไซด์เพิ่มขึ้น การขยายตัวสูงสุดของโคมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มที่แตกต่างไปจากผลการขยายตัวของโคมชนิดอื่นที่แสดงผลไว้ก่อนหน้านี้ และโคมที่ผสมซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ส่วนผสม ใช้เวลาในการขยายตัวถึงจุดสูงสุดน้อยกว่าโคมอะลูมิเนียมด้วย โดยโคมที่ผสมซิงก์ออกไซด์ 3 wt.% มีการขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 448% ที่เวลา 315 s และโคมที่ผสมซิงก์ออกไซด์ 1 wt.% มีการขยายตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 409% ที่เวลา 300 s อย่างไรก็ตามการขยายตัวสูงสุดของโคมที่ผสมซิงก์ออกไซด์ 1 wt.% ยังคงมีค่ามากกว่าการขยายตัวสูงสุดของโคมอะลูมิเนียม โดยที่อัตราการขยายตัวและอัตราการพังตัวของโคมทั้ง 3 ส่วนผสม มีค่าใกล้เคียงกันแต่ยังคงมีอัตราการขยายตัวและอัตราการพังตัวน้อยกว่าโคมอะลูมิเนียม

4.5 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม (Macrostructure)

ตารางที่ 4.3 แสดงโครงสร้างมหภาคและตารางที่ 4.4 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Al foam) และโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 รวมทั้งโฟมที่ผสมซีเมนต์จากโรงไฟฟ้า ซิลิกาและซิลิกอนคาร์ไบด์

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะเห็นได้ชัดว่ามีการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโพมปริมาณมากซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมไปที่ฐานเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากนั้นภายในโครงสร้างยังพบโพรงอากาศขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศขนาดเล็ก จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าปริมาณโพรงอากาศเท่ากับ 114 โพรง เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงอากาศภายในโครงสร้างมีขนาดเท่ากับ 1.83 mm และมีสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นเท่ากับ 77.18% ดังแสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนั้นภายในโครงสร้างโฟมยังพบการฉีกขาดของผนังโพรงอากาศที่บริเวณด้านบนของโครงสร้างโฟมด้วย

สำหรับโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ทุกขนาด พบว่าในโฟมที่ผสมซีเมนต์ทุกขนาด เมื่อปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3 wt.% ความสูงของโฟมมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาโพรงอากาศภายในโครงสร้างโฟม พบว่าโพรงอากาศภายในโครงสร้างโฟมมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และไม่พบการรวมตัวกันของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโฟมในทุกส่วนผสม สำหรับ โฟมที่ผสมซีเมนต์ที่มีขนาดเท่ากัน มีจำนวนโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นน้อยลงเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาโฟมที่ผสมซีเมนต์ในปริมาณเท่ากัน พบว่าเมื่อซีเมนต์มีขนาดลดลง จากขนาดเฉลี่ย 364, 199, 81, 18 μm ความสูงของโฟมมีขนาดลดลงตามลำดับ ดังรูปที่แสดงในตารางที่ 4.3 และมีขนาดของโพรงอากาศใหญ่ขึ้น โดยพิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงอากาศ นอกจากนั้นยังพบว่าโฟมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 18 μm ไม่มีการขยายตัวเกิดขึ้นที่ส่วนผสมซีเมนต์ 3 wt.%

ส่วนโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 พบว่าโฟมที่ผสมซีเมนต์ทุกขนาด (ขนาดเฉลี่ย 401, 210, 75, 15 μm) เมื่อโฟมมีปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้น ความสูงของโฟมมีขนาดลดลงตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่าจำนวนโพรงอากาศภายในโครงสร้างและค่าสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับการกระจายตัวของโพรงอากาศภายในโครงสร้างโฟมนั้นยังคงมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และที่บริเวณฐานของโฟมทุกส่วนผสมไม่พบการรวมตัวกันของเนื้อ

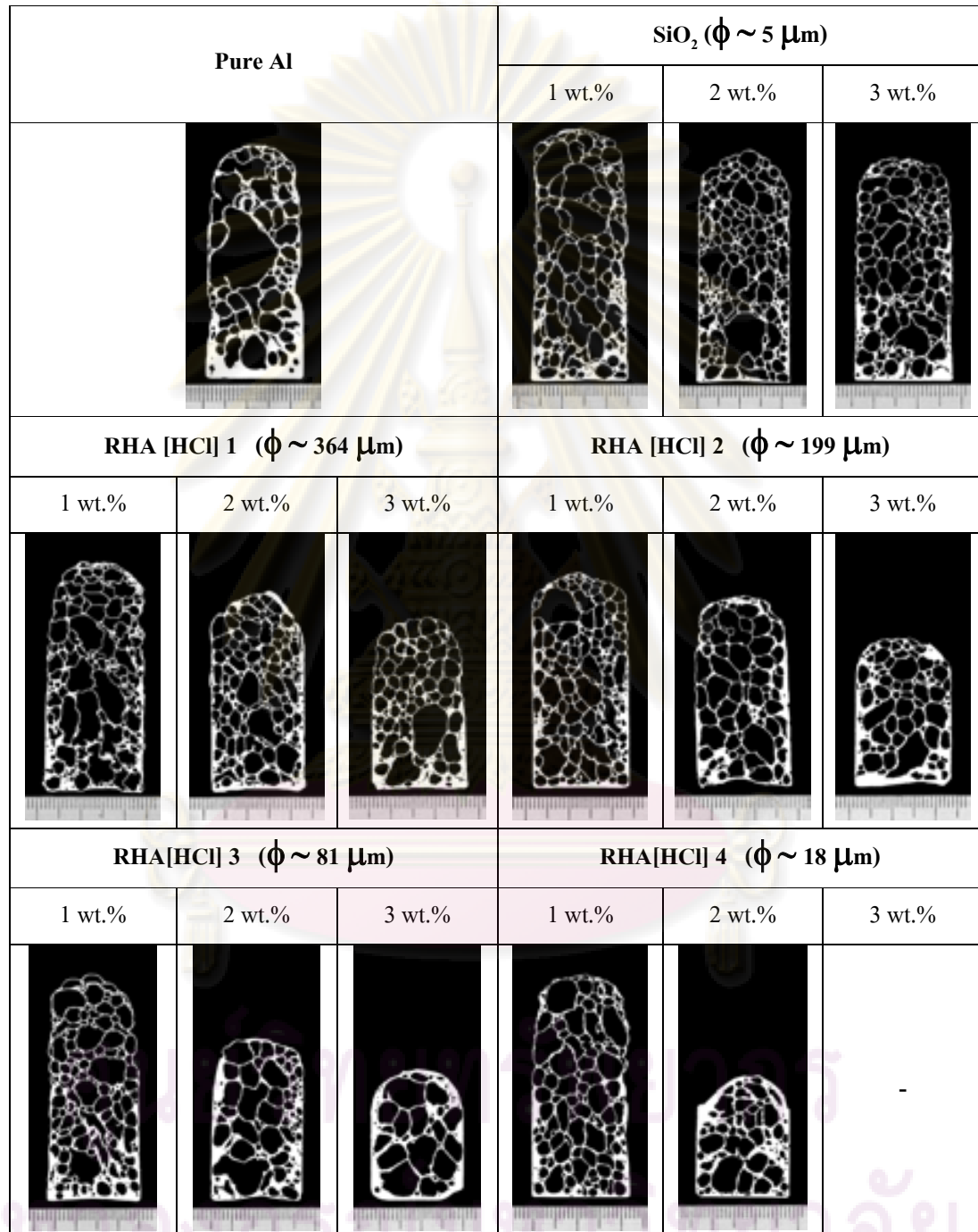
โลหะ เมื่อพิจารณาโพลีที่ผสมซีเมนต์ในปริมาณเท่ากัน โพลีจะมีความสูงลดลงเมื่อขนาดของซีเมนต์เคลือบเล็กลง และยังพบว่าเมื่อขนาดของซีเมนต์เคลือบลดลง โพรงอากาศมีค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ส่วนโพลีที่ผสมซีเมนต์เคลือบขนาดเฉลี่ย 15 μm พบว่าที่ปริมาณซีเมนต์เคลือบ 3 wt.% ไม่มีการขยายตัวของโพลีเกิดขึ้น

โพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์เคลือบจากโรงไฟฟ้า พบว่าโพรงอากาศยังคงมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอภายในโครงสร้างและไม่พบการรวมตัวกันของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโพลีในทั้ง 3 ส่วนผสม เมื่อโพลีมีปริมาณของซีเมนต์เคลือบเพิ่มขึ้น โพลีมีความสูงและจำนวนของโพรงอากาศภายในโครงสร้างน้อยลง โดยที่โพลีมีโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณของซีเมนต์เคลือบเพิ่มขึ้น

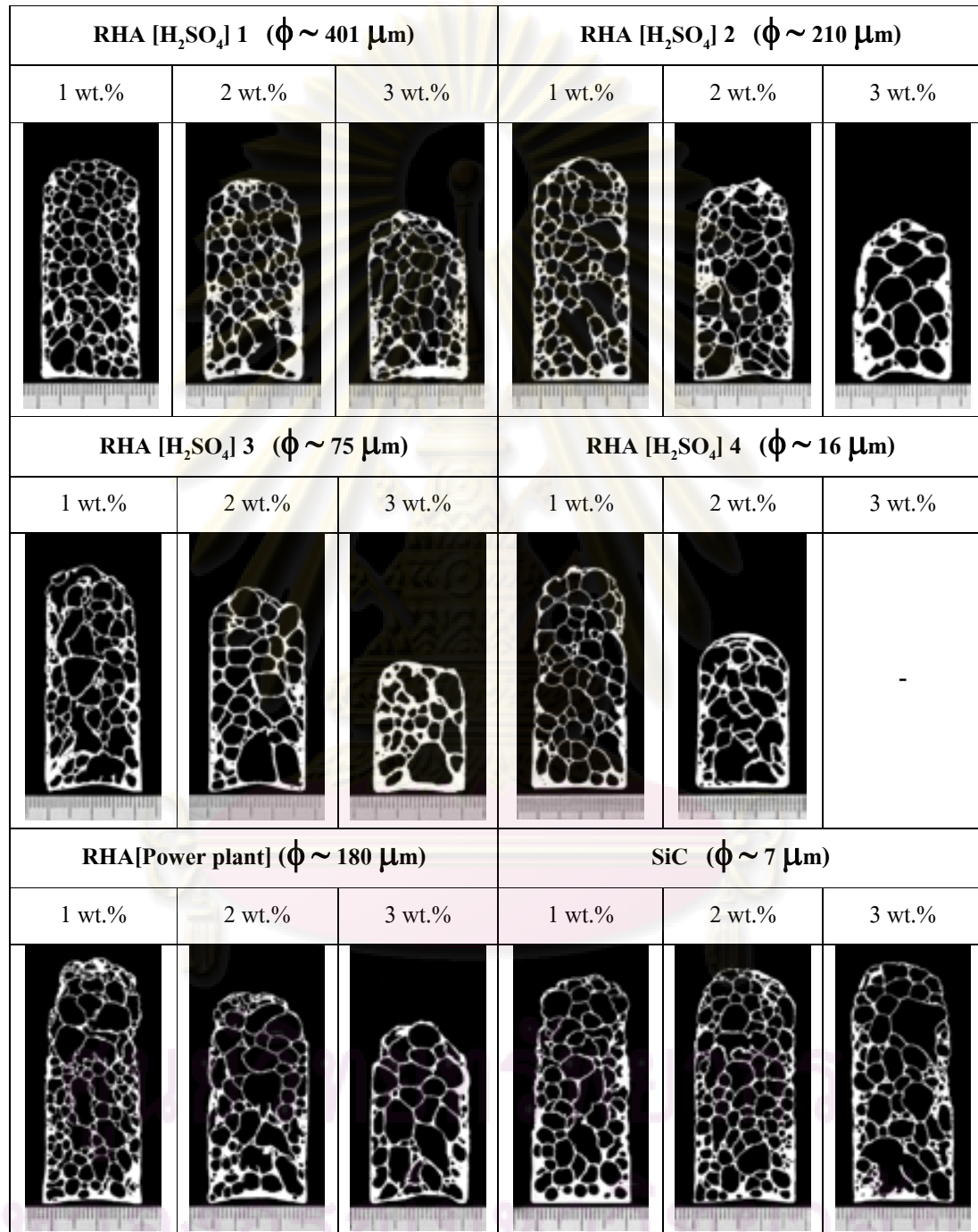
ส่วนโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกา พบว่าภายในโครงสร้างของโพลีทั้ง 3 ส่วนผสมมีการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอและไม่พบการรวมตัวกันของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานโพลีสำหรับความสูงของโพลียังคงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นความสูงของโพลีมีขนาดลดลง แต่พบว่าโพลีผสมซิลิกาที่มีความสูงค่าที่สุดยังคงมีความสูงมากกว่าโพลีที่ผสมซีเมนต์เคลือบทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ภายในโครงสร้างโพลีผสมซิลิกายังมีจำนวนปริมาณโพรงอากาศมากกว่า โพลีผสมซีเมนต์เคลือบทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณเท่ากัน สำหรับโพลีที่ผสมซิลิกาอัตราส่วน 1 , 2 , 3 wt.% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 1.54, 1.64, 1.59 mm ตามลำดับ และสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศและเนื้อพื้นเท่ากับ 78.98%, 77.62%, 78.19% ตามลำดับ

สำหรับโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ พบว่าแนวโน้มความสูงของโพลีไม่เหมือนกับโพลีชนิดอื่นที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยเมื่อปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นความสูงของโพลีก็มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะของโครงสร้างโพลี พบว่าที่บริเวณฐานโพลีไม่มีการรวมตัวกันของเนื้อโลหะและมีการกระจายตัวของโพรงอากาศอย่างสม่ำเสมอ เมื่อปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น โพลีมีจำนวนโพรงอากาศภายในโครงสร้างมากขึ้นโดยที่มีขนาดของโพรงอากาศลดลง สำหรับสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นนั้น มีค่ามากขึ้นเมื่อโพลีมีปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม



ตารางที่ 4.3 (ต่อ) โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม

| Materials | | N | Mean diameter (mm) | SD (mm) | Area fraction (%) |
|---|--------|-----|--------------------|---------|-------------------|
| Pure Al | | 114 | 1.83 | 2.09 | 77.18 |
| RHA [HCl] 1 | 1 wt.% | 231 | 1.41 | 1.54 | 76.06 |
| | 2 wt.% | 215 | 1.42 | 1.27 | 76.56 |
| | 3 wt.% | 134 | 1.64 | 1.58 | 72.18 |
| RHA [HCl] 2 | 1 wt.% | 207 | 1.62 | 1.41 | 81.47 |
| | 2 wt.% | 112 | 2.01 | 1.72 | 73.11 |
| | 3 wt.% | 110 | 1.72 | 1.48 | 72.39 |
| RHA [HCl] 3 | 1 wt.% | 192 | 1.66 | 1.43 | 75.71 |
| | 2 wt.% | 109 | 1.71 | 1.76 | 68.38 |
| | 3 wt.% | 76 | 1.54 | 2.10 | 68.23 |
| RHA [HCl] 4 | 1 wt.% | 160 | 1.86 | 1.59 | 77.18 |
| | 2 wt.% | 102 | 1.40 | 1.46 | 68.92 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 1 | 1 wt.% | 189 | 1.71 | 1.37 | 79.01 |
| | 2 wt.% | 145 | 1.70 | 1.57 | 77.33 |
| | 3 wt.% | 146 | 1.53 | 1.48 | 73.63 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 2 | 1 wt.% | 133 | 2.04 | 1.70 | 78.81 |
| | 2 wt.% | 147 | 1.73 | 1.58 | 74.90 |
| | 3 wt.% | 45 | 2.52 | 2.51 | 71.11 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 3 | 1 wt.% | 154 | 1.61 | 1.82 | 74.25 |
| | 2 wt.% | 97 | 2.14 | 2.09 | 77.54 |
| | 3 wt.% | 42 | 2.45 | 2.07 | 71.78 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 4 | 1 wt.% | 102 | 2.38 | 1.74 | 77.71 |
| | 2 wt.% | 80 | 1.96 | 2.08 | 76.99 |
| RHA [Power plant] | 1 wt.% | 185 | 1.75 | 1.49 | 75.39 |
| | 2 wt.% | 127 | 1.93 | 1.84 | 80.89 |
| | 3 wt.% | 78 | 2.17 | 2.17 | 76.64 |
| SiO ₂ | 1 wt.% | 231 | 1.54 | 1.60 | 78.98 |
| | 2 wt.% | 231 | 1.64 | 1.35 | 77.62 |
| | 3 wt.% | 218 | 1.59 | 1.45 | 78.19 |
| SiC | 1 wt.% | 94 | 2.67 | 1.69 | 77.58 |
| | 2 wt.% | 141 | 2.23 | 1.51 | 79.43 |
| | 3 wt.% | 168 | 1.65 | 1.92 | 80.38 |

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดของโพรงอากาศภายในโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม

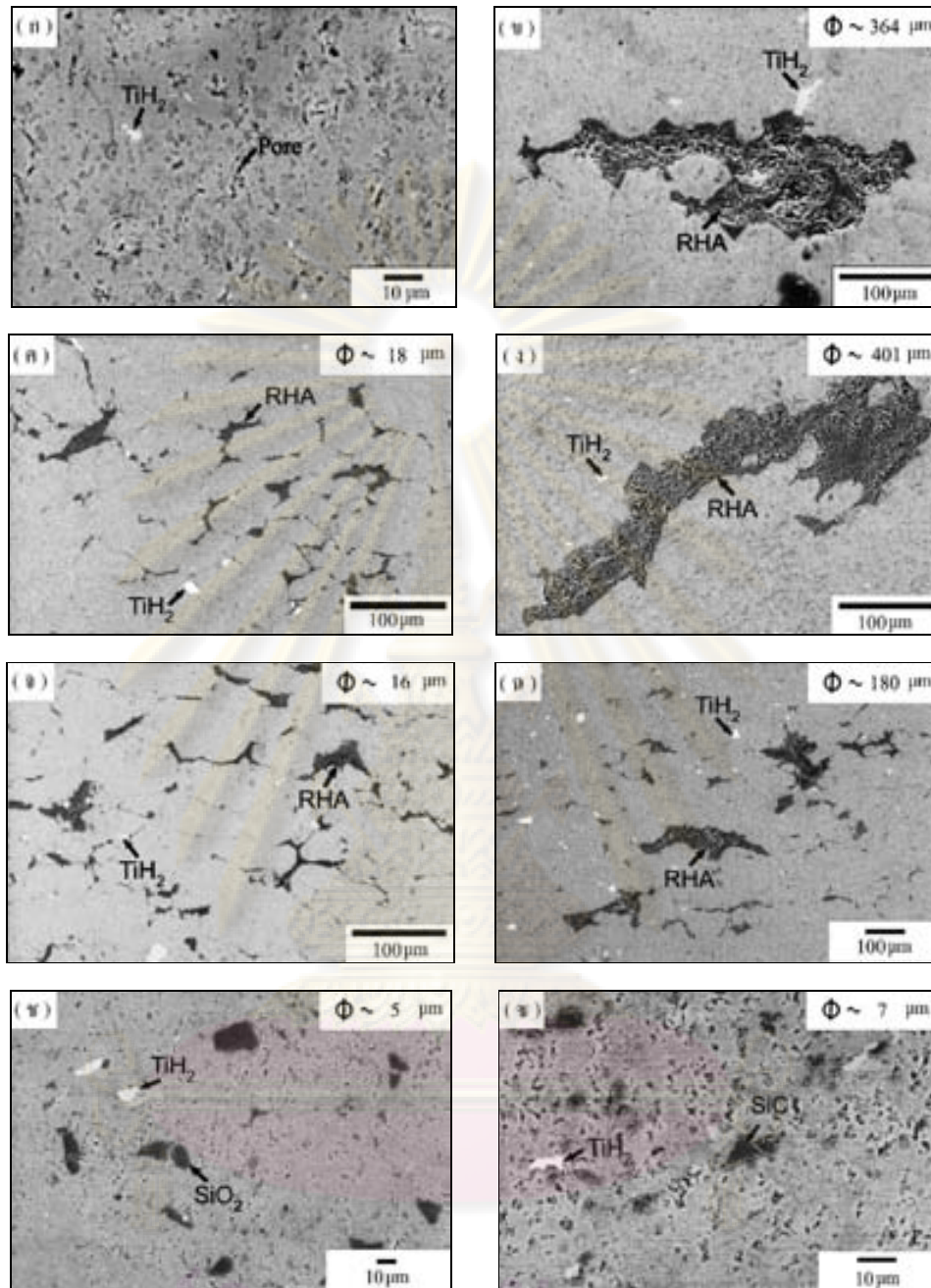
4.6 โครงสร้างจุลภาคของโพลิอะลูมิเนียม (Microstructure)

4.6.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังอัด (Microstructure of precursor)

รูปที่ 4.16 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังอัดที่วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ในโหมด Back scattering โดยรูปที่ 4.16(ก) เป็นชิ้นงานหลังอัดของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่าภายในเนื้อชิ้นงานมีอนุภาคไทเทเนียมไฮดรอกไซด์กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นพบว่า มีรูพรุนขนาดประมาณ $1\ \mu\text{m}$ อยู่จำนวนมาก สำหรับชิ้นงานหลังอัดที่ผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl (รูปที่ 4.16(ข) และรูปที่ 4.16(ค)) พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไฮดรอกไซด์และอนุภาคซีเมนต์มีการกระจายตัวที่ค้ำอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียม โดยอนุภาคซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่มีการแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ รวมตัวกันอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียม เนื่องจากอนุภาคซีเมนต์ถูกอัดจนเกิดการแตกหักในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปผงโลหะ ส่วนรูปที่ 4.16(ง) และ 4.16(จ) เป็นชิ้นงานหลังอัดที่ผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 โดยที่ชิ้นงานทั้งสองนี้มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซีเมนต์และไทเทเนียมไฮดรอกไซด์เหมือนกับชิ้นงานในรูปที่ 4.16(ข) และรูปที่ 4.16(ค) และยังคงพบการรวมตัวของชิ้นส่วนซีเมนต์เล็กๆ ที่เกิดจากการแตกของซีเมนต์ขนาดใหญ่อยู่ภายในเนื้ออะลูมิเนียม

รูปที่ 4.16(ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังอัดที่ผสมซีเมนต์จากโรงไฟฟ้า เนื่องจากซีเมนต์จากโรงไฟฟ้ามีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นช่วงกว้าง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าทั้งอนุภาคซีเมนต์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคซีเมนต์มีการแตกหักเกิดขึ้นเหมือนกับชิ้นงานที่ผสมซีเมนต์ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

รูปที่ 4.16(ช) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังอัดที่ผสมอนุภาคซิลิกา พบว่ามีทั้งอนุภาคไทเทเนียมไฮดรอกไซด์และซิลิกากระจายตัวอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมและพบว่าอนุภาคซิลิกามีการแตกหักเกิดขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแรงอัดจากกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผง ส่วนในรูปที่ 4.16(ซ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังอัดที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ พบว่าภายในเนื้ออะลูมิเนียมมีอนุภาคไทเทเนียมไฮดรอกไซด์และซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่ โดยที่อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวอยู่เป็นกลุ่มเล็กๆ และไม่พบการแตกหักของอนุภาคเกิดขึ้น



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางชิ้นงานหลังอัด (ก) Pure Al

(ข) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 1) (ค) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 4) (ง) 3 wt.%ash (RHA [H₂SO₄] 1)

(จ) 3 wt.%ash (RHA [H₂SO₄] 4) (ฉ) 3 wt.%ash (RHA [Power plant]) (ช) 3 wt.%SiO₂

(ซ) 3 wt.%SiC

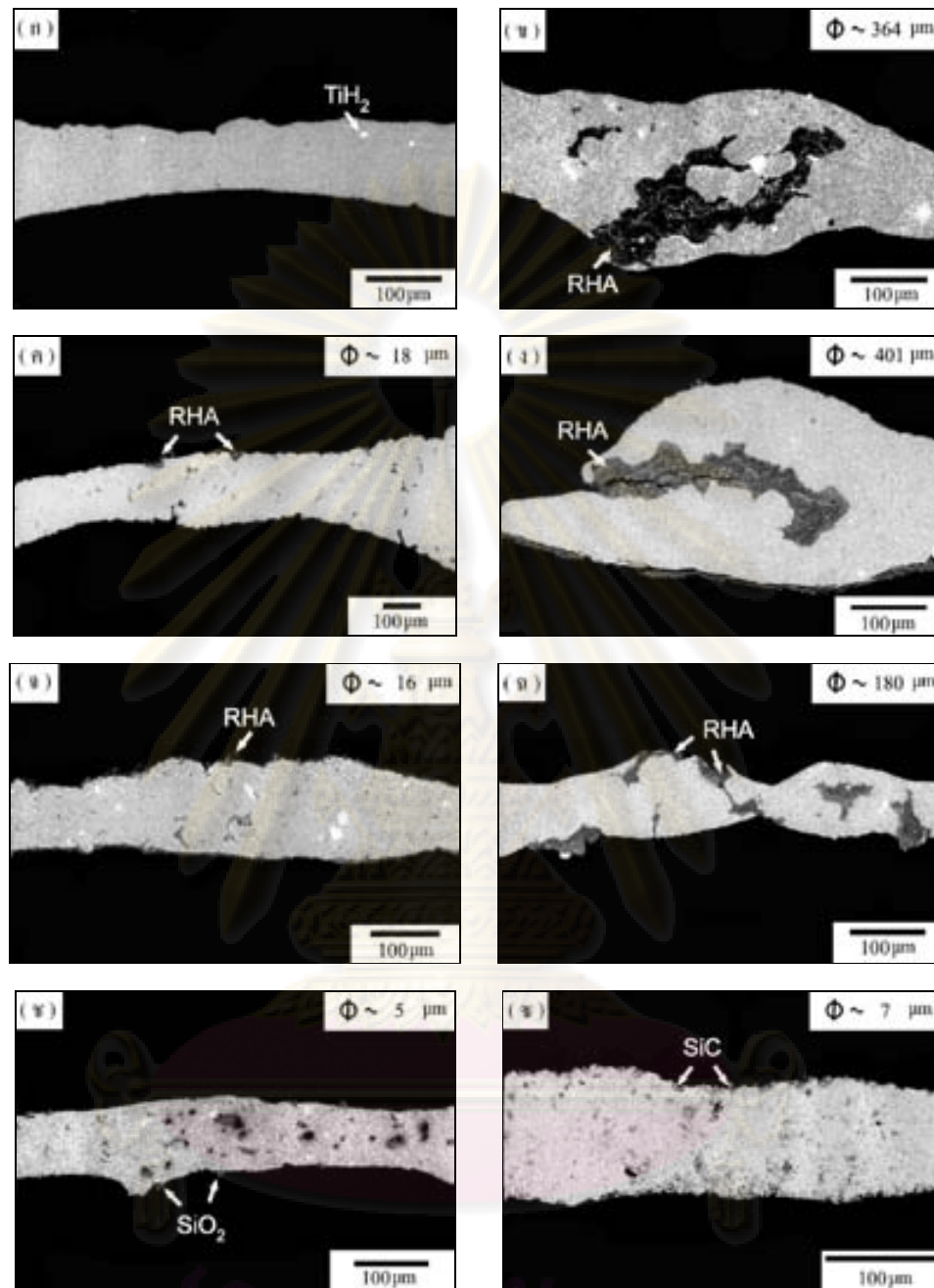
4.6.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผนังโพรงอากาศ (Microstructure of cell wall)

จากรูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โพลีอะลูมิเนียมผสมซีเอ็นทีที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 ที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% โพลีอะลูมิเนียมผสมซีเอ็นทีที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 ที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% โพลีอะลูมิเนียมผสมซิลิกาที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% และโพลีอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% ซึ่งผ่านการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (SEM) ในโหมด Back scattering จากรูปที่ 4.17(ก) แสดงผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่าภายในเนื้อโพลีอะลูมิเนียมมีแต่อนุภาคไทเทเนียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นอนุภาคที่หลุดจากการสลายตัวไม่หมด

ส่วนผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเอ็นทีที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และซีเอ็นทีที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 พบว่าอนุภาคซีเอ็นทีที่เกิดการแตกหักในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงนั้น ยังคงรวมตัวกันอยู่เป็นกลุ่มและฝังตัวอยู่ในเนื้อโพลีอะลูมิเนียม สำหรับในบริเวณที่มีอนุภาคซีเอ็นทีที่หลุดออกขนาดใหญ่ฝังตัวอยู่ ผนังโพรงอากาศบริเวณนั้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นและมีอนุภาคซีเอ็นทีที่หลุดออกบางส่วน ไส้ล่อออกจากเนื้อโพลีอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.17(ข) และรูปที่ 4.17(ค) ส่วนผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซีเอ็นทีที่ขนาดเล็ก มีการกระจายตัวของซีเอ็นทีที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อโพลีอะลูมิเนียม โดยเฉพาะบริเวณขอบของผนังโพรงอากาศจะมีอนุภาคซีเอ็นทีที่ฝังตัวอยู่จำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.17(ค) และรูปที่ 4.17(ง)

รูปที่ 4.17(ง) แสดงผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเอ็นทีที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และซีเอ็นทีที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 จากรูปพบว่าอนุภาคซีเอ็นทีที่เกิดการแตกหักยังคงรวมตัวกันและฝังตัวอยู่ในเนื้อโพลีอะลูมิเนียม อนุภาคซีเอ็นทีที่ฝังตัวอยู่ตามขอบของผนังโพรงอากาศโดยที่มีบางส่วนหลุดออกจากเนื้อโพลีอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.17(ข) แสดงผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกา พบว่า ทั้งบริเวณตรงกลางและบริเวณขอบของผนังโพรงอากาศมีอนุภาคซิลิกาฝังตัวอยู่ โดยที่อนุภาคซิลิกาที่มีการกระจายตัวที่ดีอยู่ในเนื้อโพลีอะลูมิเนียม ไม่พบการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกาที่เกิดการแตกหัก และสำหรับรูปที่ 4.17(ค) แสดงผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ จากรูปพบว่า อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี และอนุภาคส่วนใหญ่มีการฝังตัวอยู่ในบริเวณขอบของผนังโพรงอากาศ



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม (ก) Pure Al
 (ข) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 1) (ค) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 4) (ง) 3 wt.%ash (RHA [H₂SO₄] 1)
 (จ) 3 wt.%ash (RHA [H₂SO₄] 4) (ฉ) 3 wt.%ash (RHA [Power plant]) (ช) 3 wt.%SiO₂
 (ซ) 3 wt.%SiC

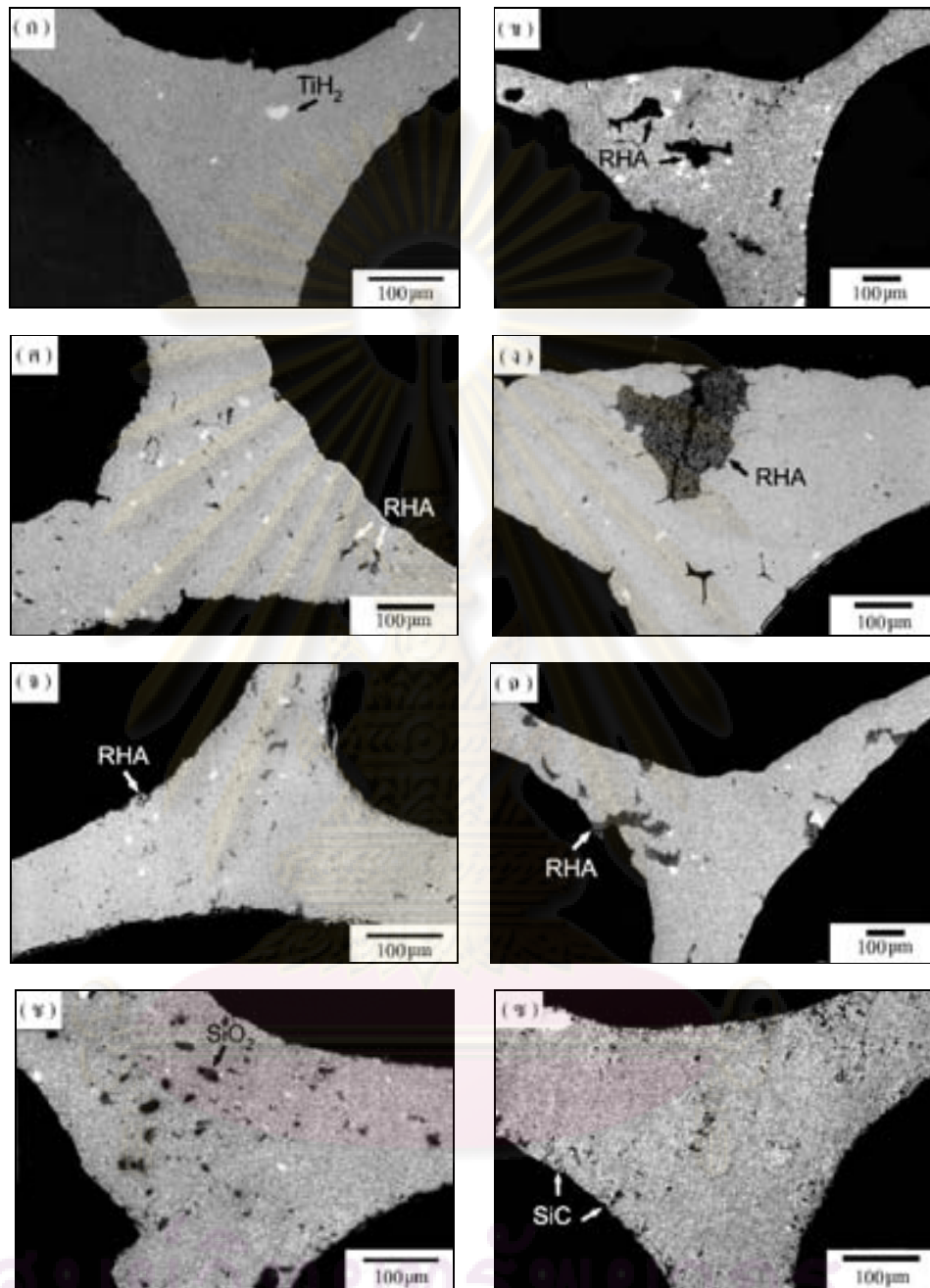
4.6.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Plateau border (Microstructure of Plateau border)

รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ Plateau border ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 ที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% โฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ที่สกัดจากโรงไฟฟ้าที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% โฟมอะลูมิเนียมผสมซิลิกาที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% และโฟมอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% ที่ผ่านการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ในโหมด Back scattering ในรูปที่ 4.18 (ก) แสดงบริเวณ Plateau border ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่าภายในเนื้ออะลูมิเนียมมีอนุภาคไทเทเนียมไฮดรอกไซด์กระจายตัวอยู่เพียงอย่างเดียว

สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 พบว่า บริเวณ Plateau border มีอนุภาคซีเมนต์กระจายตัวอยู่ภายในเนื้ออะลูมิเนียม สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์ขนาดใหญ่ บริเวณที่มีอนุภาคซีเมนต์ฝังตัวอยู่ Plateau border ในบริเวณนั้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่มีอนุภาคซีเมนต์บางส่วนโผล่ออกจากเนื้ออะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.18(ข)และรูปที่ 4.18(ง) ส่วนโฟมที่ผสมซีเมนต์ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก พบว่าอนุภาคซีเมนต์กระจายตัวอยู่ทั้งภายในเนื้ออะลูมิเนียมและบริเวณขอบของ Plateau border ดังรูปที่ 4.18(ค)และรูปที่ 4.18(จ)

รูปที่ 4.18(ฉ) แสดงบริเวณ Plateau border ของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ที่สกัดจากโรงงานไฟฟ้า พบว่าอนุภาคซีเมนต์ที่แตกหักยังคงจับตัวกันและกระจายตัวอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียม โดยอนุภาคส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบของ Plateau border

ส่วนบริเวณ Plateau border ของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกา พบว่าอนุภาคซิลิกาส่วนใหญ่ฝังตัวกระจายอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมบริเวณตรงกลางของ Plateau border ดังรูปที่ 4.18(ช) และสำหรับบริเวณ Plateau border ของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ รูปที่ 4.18(ซ) พบว่าอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบ และมีบางส่วนกระจายตัวอยู่ตรงกลางของ Plateau border



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวาง Plateau border ของโฟมอะลูมิเนียม (ก) Pure Al
 (ข) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 1) (ค) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 4) (ง) 3 wt.%ash (RHA [H₂SO₄] 1)
 (จ) 3 wt.%ash (RHA [H₂SO₄] 4) (ฉ) 3 wt.%ash (RHA [Power plant]) (ช) 3 wt.%SiO₂
 (ฌ) 3 wt.%SiC

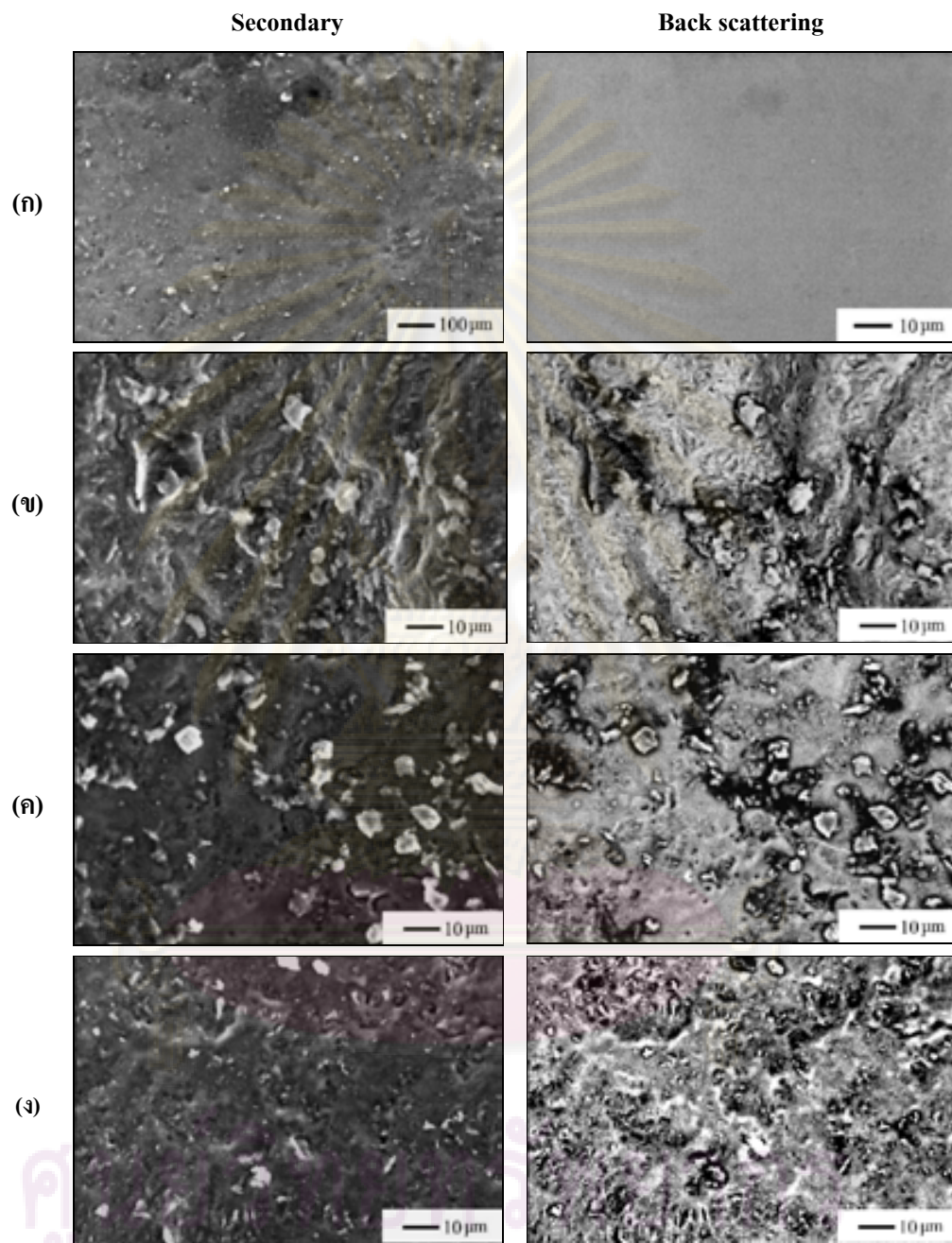
4.6.4 พื้นผิวผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียม (Surface of cell wall)

พื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์-แคลสที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 ที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% โพลีอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์-แคลสจากโรงไฟฟ้าที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% โพลีอะลูมิเนียมผสมซิลิกาที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% และโพลีอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนผสม 3 wt.% ซึ่งถูกวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) ทั้งโหมด Secondary และ โหมด Back scattering ซึ่งผลการวิเคราะห์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.19 พื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.19(ก) พบว่า มีอนุภาคเล็กๆกระจายตัวอยู่บนผิวของผนังโพรงอากาศ เมื่อวิเคราะห์ด้วยโหมด Back scattering พบว่ามีเพียงอนุภาคไทเทเนียมไฮดรอกไซด์กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของผนังโพรงอากาศที่มีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบ

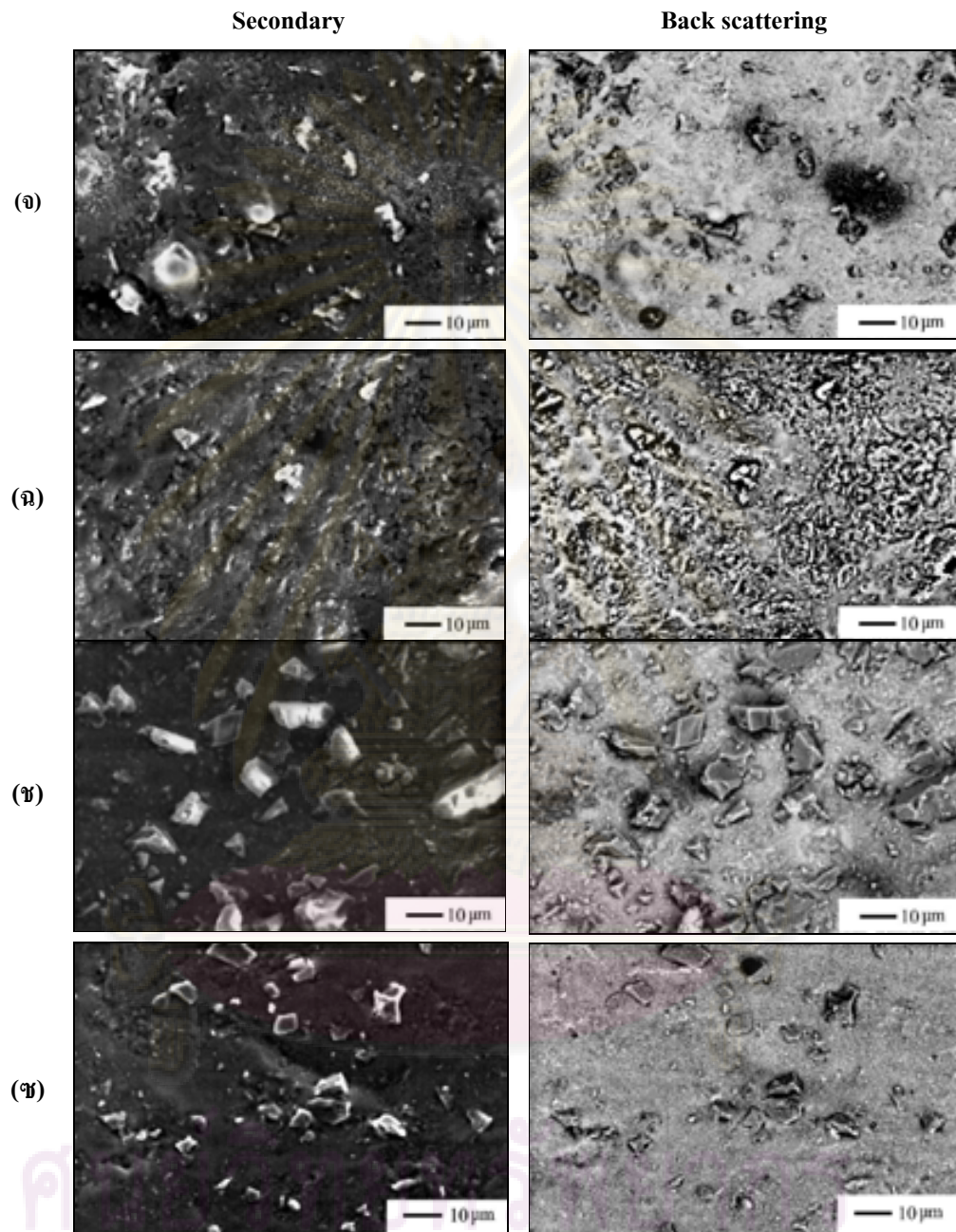
สำหรับพื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์-แคลสที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 จะเห็นว่า มีอนุภาคซีเมนต์-แคลสฝังตัวกระจายอยู่บนผิวของผนังโพรงอากาศ ซึ่งจะเห็นบางส่วนของอนุภาคซีเมนต์-แคลสที่มีขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาจากเนื้ออะลูมิเนียมดังในรูปที่ 4.19(ข) และรูปที่ 4.19(ง) ส่วนผนังโพรงอากาศของโพลีที่ผสมอนุภาคซีเมนต์-แคลสขนาดเล็ก ในรูปที่ 4.19 (ค) และรูปที่ 4.19 (จ) อนุภาคซีเมนต์-แคลสมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มๆ กระจายอยู่บนพื้นผิวของผนังโพรงอากาศ และในบริเวณที่มีอนุภาคซีเมนต์-แคลสจับตัวกันเป็นกลุ่มๆ นั้น จะมีลักษณะผิวของผนังโพรงอากาศขรุขระมากขึ้นกว่าบริเวณที่ไม่มีอนุภาคซีเมนต์-แคลสฝังตัวอยู่

รูปที่ 4.19(ฉ) แสดงลักษณะพื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์-แคลสจากโรงไฟฟ้า พบว่าอนุภาคซีเมนต์-แคลสที่กระจายอยู่บนผิวของผนังโพรงอากาศนั้นมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มเล็กๆ ซึ่งมีทั้งอนุภาคซีเมนต์-แคลสขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ทำให้ผิวของผนังโพรงอากาศส่วนใหญ่มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ

พื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซิลิกาถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.19(ซ) พบว่าอนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวคืออยู่บนพื้นผิวของผนังโพรงอากาศ โดยที่ไม่มีการจับตัวกันของอนุภาคซิลิกากับพื้นผิวของผนังโพรงอากาศ และเห็นได้ชัดว่าผนังโพรงอากาศมีลักษณะผิวขรุขระเพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกันกับพื้นผิวผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อยู่บนพื้นผิวโพรงอากาศ



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม (ก) Pure Al (ข) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 1) (ค) 3 wt.%ash (RHA [HCl] 4) (ง) 3 wt.%ash (RHA [H₂SO₄] 1)



รูปที่ 4.19 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของผนังโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม

(จ) 3 wt.%ash (RHA [H_2SO_4]) (ข) 3 wt.%ash (RHA [Power plant]) (ง) 3 wt.% SiO_2

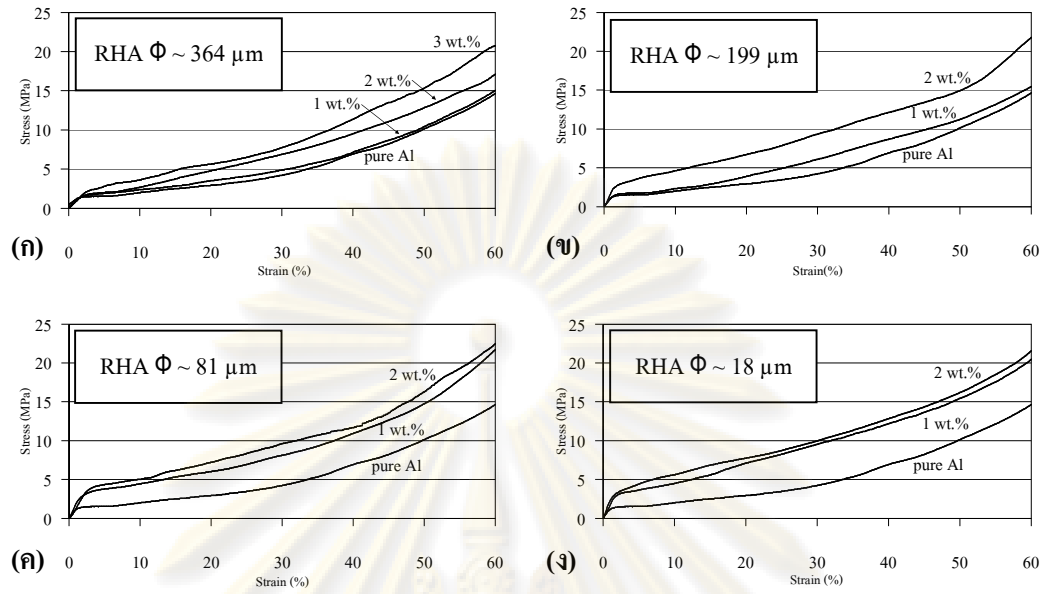
(ฉ) 3 wt.%SiC

4.7 ความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม (Compressive test)

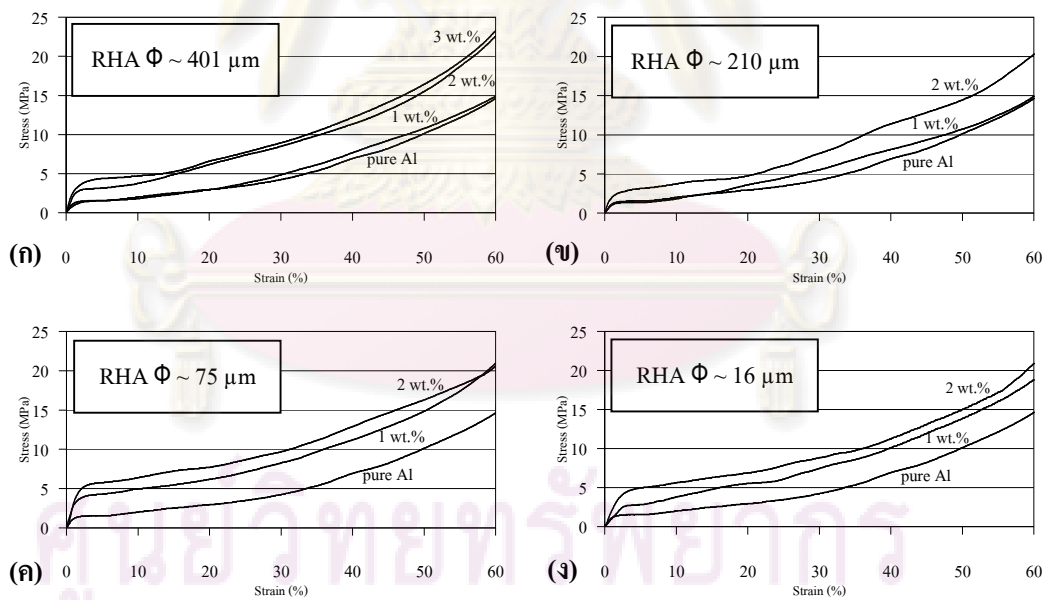
การวัดความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม จะใช้ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านการตัดบริเวณหัวและท้าย ขนาดความสูง 20 mm และมีความหนาแน่น $0.6 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ ในการทดสอบจะใช้อัตราความเครียด 5 mm/min และสิ้นสุดการทดสอบที่ความเครียด 60% ผลการทดสอบจะถูกแสดงไว้ในรูปแบบกราฟระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) โดยจะแสดงเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และมีการแสดงค่าสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมต่างๆไว้ในตารางที่ 4.5

สำหรับการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่าเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบมีรูปร่างคล้ายกับเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทั่วไปในงานวิจัยอื่นๆ [34] โดยเส้นกราฟจะมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของความเค้นอย่างรวดเร็วในความเครียดช่วงแรก จากนั้นเมื่อค่าความเครียดเพิ่มขึ้นค่าความเค้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงความเครียดในช่วงสุดท้ายจะมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นอย่างรวดเร็วจนสิ้นสุดการทดสอบที่ 60% ของความเครียด หลังจากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จากกราฟที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดแล้ว พบว่ามีค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) เท่ากับ 1.23 MPa ส่วนความสามารถในการดูดซับพลังงาน (E_{60}) เท่ากับ 3.36 MJ/cm^3 และค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน (η) เท่ากับ 0.38

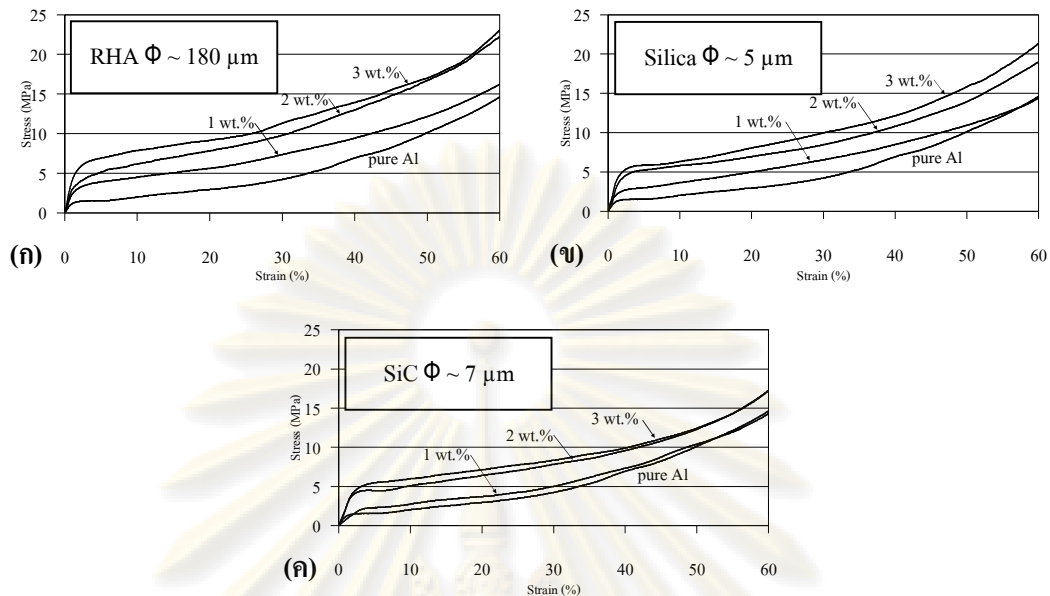
การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ดังรูปที่ 4.20 พบว่าโฟมที่มีส่วนผสมซีเมนต์ขนาดเฉลี่ย 199, 81 และ $18 \mu\text{m}$ ที่ปริมาณซีเมนต์ 3 wt.% มีความสูงของโฟมไม่ถึงช่วงที่กำหนดไว้ คือ 30 mm จึงไม่สามารถทำการทดสอบการรับแรงอัดได้ จากผลการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ในทุกส่วนผสมมีแนวโน้มผลการทดสอบไปในทางเดียวกันคือ เมื่อผสมซีเมนต์ในโฟมอะลูมิเนียมแล้วโฟมจะมีสมบัติทางกลดีกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ สำหรับโฟมที่ผสมซีเมนต์ขนาดเท่ากัน พบว่าเมื่อปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน และค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานของโฟมมีค่ามากขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาโฟมที่มีปริมาณของซีเมนต์เท่ากัน จะพบว่าโฟมมีค่าสมบัติทางกลต่างๆน้อยลงเมื่อขนาดของซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยสามารถดูค่าสมบัติทางกลต่างๆของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl ได้จากตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl (ก) RHA[HCl] 1, (ข) RHA[HCl] 2, (ค) RHA[HCl] 3, (ง) RHA[HCl] 4



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์ที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 (ก) RHA [H_2SO_4] 1, (ข) RHA [H_2SO_4] 2, (ค) RHA [H_2SO_4] 3, (ง) RHA [H_2SO_4] 4



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกาและโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์

(ก) RHA [Power plant] , (ข) SiO_2 , (ค) SiC

จากรูปที่ 4.21 แสดงผลของการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 จากผลการทดสอบพบว่า โฟมที่มีการผสมซีเถ้าแกลบชนิดนี้ยังคงมีค่าสมบัติทางกลดีกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และยังพบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด H_2SO_4 ที่มีขนาดเฉลี่ย 210, 75 และ 16 μm ที่ปริมาณซีเถ้าแกลบ 3 wt.% มีความสูงของโฟมไม่ถึงค่าความสูงที่กำหนด จึงไม่สามารถนำมาทดสอบการรับแรงอัดได้ ส่วนแนวโน้มของการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมส่วนผสมอื่นยังคงเหมือนเดิม คือ ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน และค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของซีเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น และค่าสมบัติทางกลดังกล่าวยังมีค่าลดลงเมื่อขนาดเฉลี่ยของซีเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ค่าสมบัติทางกลต่างๆของโฟมชนิดนี้ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.22(ก) พบว่าเมื่อปริมาณของซีเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น โฟมมีค่าสมบัติทางกลมากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกลของโฟมที่ผสมซีเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้ากับโฟมที่ผสมซีเถ้าแกลบที่ผ่านการสกัดด้วยกรด HCl และกรด H_2SO_4 แล้ว พบว่าความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนก็คือ ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานของโฟมที่ผสมซีเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้ามีค่ามากกว่า

ส่วนโคมที่ผสมชิลิกามีผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.22(ข) เมื่อวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกลของโคมแล้ว พบว่าเมื่อโคมมีการผสมอนุภาคชิลิกามากขึ้น ค่าสมบัติทางกลของโคมก็มีค่ามากขึ้นตามลำดับ ซึ่งเช่นเดียวกับโคมที่ผสมอนุภาคชิลิกอนคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.22(ค) เมื่อโคมมีปริมาณของอนุภาคชิลิกอนคาร์ไบด์มากขึ้น โคมก็มีค่าสมบัติทางกลดีขึ้นเช่นกันกับโคมที่ผสมอนุภาคชนิดอื่นดังที่กล่าวไปแล้ว สามารถดูค่าสมบัติทางกลของโคมที่ผสมซีเมนต์จากโรงไฟฟ้า โคมที่ผสมชิลิกาและโคมที่ผสมชิลิกอนคาร์ไบด์ได้จากตารางที่ 4.5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| ส่วนผสม | | ความหนาแน่น (g/cm ³) | Yield strength (MPa) | E _{60%} (MJ/cm ³) | η |
|---|--------|-------------------------------------|-------------------------|---|------|
| Pure Al | | 0.58 | 1.23 | 3.36 | 0.38 |
| RHA [HCl] 1 | 1 wt.% | 0.56 | 1.16 | 3.60 | 0.40 |
| | 2 wt.% | 0.62 | 1.87 | 4.56 | 0.44 |
| | 3 wt.% | 0.65 | 2.39 | 5.61 | 0.45 |
| RHA [HCl] 2 | 1 wt.% | 0.57 | 1.68 | 4.02 | 0.43 |
| | 2 wt.% | 0.64 | 2.65 | 5.92 | 0.45 |
| RHA [HCl] 3 | 1 wt.% | 0.61 | 3.16 | 5.58 | 0.43 |
| | 2 wt.% | 0.63 | 3.67 | 6.21 | 0.46 |
| RHA [HCl] 4 | 1 wt.% | 0.61 | 3.03 | 5.96 | 0.48 |
| | 2 wt.% | 0.64 | 3.16 | 6.41 | 0.49 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 1 | 1 wt.% | 0.61 | 1.35 | 3.58 | 0.40 |
| | 2 wt.% | 0.65 | 2.77 | 5.72 | 0.42 |
| | 3 wt.% | 0.65 | 3.10 | 6.13 | 0.44 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 2 | 1 wt.% | 0.54 | 1.29 | 3.74 | 0.42 |
| | 2 wt.% | 0.60 | 2.58 | 5.28 | 0.43 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 3 | 1 wt.% | 0.61 | 3.74 | 5.69 | 0.45 |
| | 2 wt.% | 0.60 | 4.26 | 6.51 | 0.52 |
| RHA [H ₂ SO ₄] 4 | 1 wt.% | 0.58 | 2.71 | 5.71 | 0.45 |
| | 2 wt.% | 0.63 | 4.00 | 5.90 | 0.47 |
| RHA [Power plant] | 1 wt.% | 0.63 | 2.58 | 4.83 | 0.49 |
| | 2 wt.% | 0.64 | 3.34 | 6.59 | 0.50 |
| | 3 wt.% | 0.65 | 4.77 | 7.26 | 0.52 |
| SiO ₂ | 1 wt.% | 0.63 | 2.18 | 4.25 | 0.49 |
| | 2 wt.% | 0.57 | 4.02 | 5.69 | 0.49 |
| | 3 wt.% | 0.60 | 4.71 | 6.54 | 0.51 |
| SiC | 1 wt.% | 0.55 | 2.19 | 3.66 | 0.43 |
| | 2 wt.% | 0.56 | 3.67 | 5.08 | 0.49 |
| | 3 wt.% | 0.65 | 4.00 | 5.38 | 0.52 |

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การขยายตัวของโฟม

5.1.1 ผลของปริมาณอนุภาคต่อการขยายตัวของโฟม

จากผลการตรวจสอบการขยายตัวของโฟม พบว่าโฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบทุกส่วนผสม มีการขยายตัวได้น้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยโฟมที่ผสมซีเถ้าเคลือบมีการขยายตัวลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคซีเถ้าเคลือบเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลโดยตรงมาจากความหนาแน่นของ Precursor ที่ลดลงและความหนืดของโลหะเหลวที่เพิ่มขึ้นในขณะที่โฟมเกิดการขยายตัว ถึงแม้ว่าความหนาแน่นที่ลดลงนี้จะมีค่าเพียงเล็กน้อยและยังอยู่ในขอบเขตของความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 98% ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่ยอมรับได้สำหรับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยกรรมวิธีนี้ [9] แต่ก็มีผลอย่างมากต่อการขยายตัวของโฟม

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของ Precursor ที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบในปริมาณต่างๆ พบว่า Precursor ที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบมีความหนาแน่นลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคซีเถ้าเคลือบเพิ่มขึ้น การลดลงของความหนาแน่นของ Precursor นั้นแสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อโลหะของ Precursor มีจำนวนช่องว่างขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวของอนุภาคอะลูมิเนียมกับผิวของอนุภาคซีเถ้าเคลือบ การที่อนุภาคซีเถ้าเคลือบมีลักษณะรูปร่างอนุภาคดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งคล้ายเปลือกไม้ และมีลักษณะผิวแตกต่างกันทั้งสองด้าน โดยที่ด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นตุ่มนูนแต่อีกด้านหนึ่งเป็นผิวเรียบ ทำให้อนุภาคซีเถ้าเคลือบมีความสามารถในการยึดเกาะกับอนุภาคอะลูมิเนียมหลังการอัดขึ้นรูปได้ไม่ดี เกิดช่องว่างเล็กๆขึ้นระหว่างผิวของอนุภาคทั้งสองชนิด การที่อนุภาคซีเถ้าเคลือบมีรูปร่างที่ประกอบไปด้วยมุมส่วนโค้ง ตุ่มนูนจำนวนมาก จึงทำให้เนื้ออะลูมิเนียมไม่สามารถแทรกตัวอย่างสมบูรณ์เข้าไปในช่องว่างที่เกิดจากรูปร่างเหล่านี้ได้ นอกจากนั้นการที่อนุภาคซีเถ้าเคลือบมีลักษณะเปราะ เมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้ว อนุภาคซีเถ้าเคลือบจะแตกเป็นชิ้นเล็กๆ รวมตัวกันอยู่เป็นกลุ่มภายในเนื้อของ Precursor ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ช่องว่างเล็กๆเหล่านี้จะส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของ Precursor มีค่าลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคซีเถ้าเคลือบเพิ่มขึ้น เมื่อนำ Precursor ไปผลิตเป็นโฟมอะลูมิเนียม ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 400°C อนุภาค TiH_2 จะเริ่มเกิดการสลายตัวให้แก๊ส H_2 ประกอบกับอนุภาคอะลูมิเนียมยังไม่เกิดการหลอมขึ้น จะเกิดการสูญเสียแก๊ส H_2 บางส่วนออกจากช่องว่างเล็กๆที่อยู่ติดกันเป็นเครือข่ายในเนื้อของ Precursor [9] จึงส่งผลให้การ

ขยายตัวของโพลีเมอร์ การที่ Precursor มีปริมาณอนุภาคซีเมนต์เคลือบเพิ่มขึ้นจึงทำให้โพลีเมอร์ที่เกิดจากการขยายตัวของ Precursor นั้นขยายตัวได้ลดลงด้วย

นอกจากนี้ยังได้ศึกษากระบวนการเพิ่มความหนาแน่นของ Precursor โดยการทดลองนำ Precursor ที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 98% ไปผ่านกระบวนการอัดแบบร้อนที่อุณหภูมิ 400°C ด้วยแรงอัดขนาด 650 MPa ในบรรยากาศปกติทำให้ความหนาแน่นของ Precursor เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ไม่สามารถนำมาผลิตเป็นโพลีเมอร์ที่มีการขยายตัวมากได้ เนื่องจาก Precursor ยังคงมีความหนาแน่นไม่สูงมากนัก และยังพบปัญหาของการเกิดออกซิเดชันของอะลูมิเนียมกลายเป็นฟิล์มออกไซด์หนาที่ผิวของ Precursor ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการขยายตัวของโพลีเมอร์ [19] เมื่อนำไปผลิตเป็นโพลีเมอร์แล้วจึงพบว่า Precursor มีการขยายตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

การที่ในเนื้อโลหะมีอนุภาคเซรามิกจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของโลหะหลอมเหลวสูงขึ้น [36] การที่โลหะหลอมเหลวมีความหนืดเพิ่มขึ้นจะเป็นผลดีต่อการขยายตัวของโพลีเมอร์ แต่ถ้าโลหะหลอมเหลวมีความหนืดเพิ่มขึ้นมากเกินไปจะส่งผลให้โพลีเมอร์เกิดการขยายตัวได้ยาก ซึ่งเป็นอีกเหตุผลที่ทำให้โพลีเมอร์ผสมอนุภาคซีเมนต์เคลือบมีการขยายตัวได้น้อยลงเมื่อปริมาณของอนุภาคซีเมนต์เคลือบมากขึ้น และพบว่าโพลีเมอร์ที่ผสมซีเมนต์เคลือบชนิด RHA [HCl] 4 และ RHA [H₂SO₄] 4 ไม่สามารถขยายตัวได้เลย ซึ่งเกิดจากโลหะหลอมเหลวที่มีความหนืดมากเกินไปจนโพลีเมอร์ไม่สามารถขยายตัวได้

สำหรับโพลีเมอร์ที่ผสมอนุภาคซิลิกา นั้น สามารถขยายตัวได้มากกว่าโพลีเมอร์ที่ผสมอนุภาคซีเมนต์เคลือบทุกส่วนผสม แต่แนวโน้มการขยายตัวสูงสุดของโพลีเมอร์ที่ผสมอนุภาคซิลิกายังคงมีแนวโน้มคล้ายกับโพลีเมอร์ที่ผสมซีเมนต์เคลือบ คือสามารถขยายตัวได้น้อยลงเมื่อปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้น ทั้งๆที่ค่าความหนาแน่นของ Precursor ที่ผสมซิลิกามีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นของ Precursor ที่ผสมอนุภาคซีเมนต์เคลือบอยู่มาก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 การที่โพลีเมอร์สามารถขยายตัวได้น้อยลงเมื่อปริมาณอนุภาคซิลิกาเพิ่มขึ้นนั้น เป็นผลมาจากความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีอนุภาคซิลิกาในโลหะหลอมเหลวปริมาณมากขึ้นนั่นเอง [36]

ส่วนผลการตรวจสอบความสามารถในการขยายตัวของโพลีเมอร์ที่ผสมอนุภาคซิลิกาก่อนคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งโพลีเมอร์มีแนวโน้มการขยายตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคมากขึ้น และสามารถขยายตัวได้มากกว่าโพลีเมอร์อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทุกส่วนผสม การที่มีค่าความหนาแน่นของ Precursor ที่สูงมาก (> 99%) ดังรูปที่ 4.4 การสูญเสียแก๊ส H₂ ในระหว่างการผลิตโพลีเมอร์จึงมีน้อยมาก ความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคมากขึ้น กลับส่งผลดีทำให้โพลีเมอร์สามารถขยายตัวได้ดี ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการเปียกในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ดีของอนุภาคซิลิกาก่อนคาร์ไบด์ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 5.1.3 ต่อไป

5.1.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อการขยายตัวของโฟม

จากการตรวจสอบการขยายตัวของโฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบปริมาณเท่ากัน พบว่า โฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบทั้งสองชนิด (RHA [HCl], RHA [H₂SO₄]) มีความสามารถในการขยายตัวสูงสุดลดลง เมื่อขนาดของอนุภาคซีเถ้าเคลือบเล็กลง ที่อัตราส่วนการผสมซีเถ้าเคลือบเท่ากัน การใช้อนุภาคขนาดเล็กจะทำให้โฟมที่ผลิตได้มีจำนวนอนุภาคมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อนุภาคขนาดใหญ่ในอัตราส่วนผสมของอนุภาคเดียวกัน ซึ่งแสดงถึงขนาดของพื้นที่ผิวของอนุภาคที่สัมผัสกับน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่มากขึ้น ในระหว่างผลิตโฟมอะลูมิเนียม โฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบขนาดเล็กจะมีความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากกว่า โฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบขนาดใหญ่ ส่งผลให้โฟมมีความสามารถในการขยายตัวสูงสุดลดลงเมื่อ โฟมผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงในอัตราส่วนผสมของซีเถ้าเคลือบ

5.1.3 ผลของประเภทของอนุภาคต่อการขยายตัวของโฟม

เมื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของ โฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบทั้งสามชนิด (RHA[HCl], RHA [H₂SO₄], RHA [Power plant]) พบว่า โฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลือบทั้งสามชนิด มีความสามารถในการขยายตัวใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนผสม เมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน แสดงว่าให้เห็นชนิดของอนุภาคซีเถ้าเคลือบมีผลน้อยมากหรือไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ต่อความสามารถในการขยายตัวของโฟม

อนุภาคซิลิกาและอนุภาคซีเถ้าเคลือบต่างก็มีส่วนประกอบหลักเป็น SiO₂ เหมือนกัน ถึงแม้ว่าอนุภาคทั้งสองชนิดมีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมใน โฟมอะลูมิเนียมแล้ว ก็มีแนวโน้มการขยายตัวสูงสุดที่คล้ายคลึงกัน คือสามารถขยายตัวได้น้อยลงเมื่อปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้นนั้น แสดงว่าอนุภาคทั้งสองชนิดต้องมีคุณสมบัติบางอย่างที่ส่งผลต่อการขยายตัวของโฟมเหมือนกัน เมื่อพิจารณาการขยายตัวของโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์แล้ว ขนาดอนุภาคของซิลิกาและซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แต่ส่งผลต่อการขยายตัวของโฟมไม่เหมือนกัน ความแตกต่างที่เด่นชัดของอนุภาคทั้งสองชนิดนี้คือ ความสามารถในการเปียกของอนุภาคในน้ำโลหะอะลูมิเนียมนั่นเอง สำหรับซิลิกามีมุมสัมผัส (Contact angle) ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมเท่ากับ 150° ที่อุณหภูมิ 800°C ที่เวลาน้อยกว่า 1 นาที ส่วนอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มีมุมสัมผัสในน้ำโลหะอะลูมิเนียมประมาณ 97° ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน [41] ดังนั้นอนุภาคซิลิกาเป็นอนุภาคที่มีความสามารถในการเปียกในน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ไม่ดี เพราะมีมุมสัมผัสในน้ำโลหะอะลูมิเนียมค่อนข้างกว้าง ส่วนอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นอนุภาคที่มีความสามารถในการเปียกที่ดี เนื่องจากมีมุมสัมผัสในน้ำโลหะอะลูมิเนียมแคบกว่ามุมสัมผัสอนุภาคซิลิกา สำหรับอนุภาคที่มีความสามารถในการเปียกที่ดีนั้น โลหะเหลวจะสามารถยึดเกาะที่ผิวของอนุภาคได้ดี ดัง

แสดงในรูปที่ 2.15 ดังนั้นอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จึงน่าจะมีการกระจายตัวภายในอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ดีกว่าอนุภาคซิลิกา ทำให้สามารถเพิ่มความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้อย่างสม่ำเสมอมากกว่า ดังนั้น โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์จึงสามารถขยายตัวได้ดีกว่าโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกา ที่อัตราส่วนอนุภาคเท่ากัน

5.2 โครงสร้างของโฟม

5.2.1 ผลของปริมาณของอนุภาคต่อโครงสร้างโฟม

จากตารางที่ 4.3 แสดงโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมที่ส่วนผสมต่างๆ จากโครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบการรวมตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณฐานของโฟม ซึ่งเกิดจากการเกิด Drainage ในระหว่างกระบวนการผลิตโฟม นอกจากนั้นภายในโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ยังพบโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่เกิดจากการรวมตัวกันของโพรงอากาศขนาดเล็ก (Cell coalescence) และมีร่องรอยของการเกิดการพังตัวของผนังโพรงอากาศ (Cell wall rupture) สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซีเฝ้า์แอลบ ในโครงสร้างของโฟมที่ผสมอนุภาคซีเฝ้า์แอลบทุกส่วนผสมมีโครงสร้างที่มีโพรงอากาศกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีจำนวนโพรงอากาศมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และไม่พบการรวมตัวกันของเนื้อโลหะที่ฐานโฟม เมื่อวิเคราะห์รูปโครงสร้างโฟมด้วยโปรแกรม Image J แล้วพบว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีการกระจายของขนาดโพรงอากาศเป็นช่วงกว้าง ซึ่งดูได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าขนาดโพรงอากาศของโฟม (SD) ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ค่า SD ของโฟมที่ผสมอนุภาคซีเฝ้า์แอลบทุกส่วนผสมมีค่าน้อยกว่าค่า SD ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แสดงว่าเมื่อผสมอนุภาคซีเฝ้า์แอลบในโฟมอะลูมิเนียมแล้ว ทำให้โครงสร้างโฟมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น การเติมอนุภาคซีเฝ้า์แอลบในโฟมอะลูมิเนียมมีผลต่อการเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างโฟม โดยขณะที่โฟมเกิดการขยายตัวภายในโครงสร้างโฟมจะเกิดการไหลของอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปที่บริเวณฐาน โฟมเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อนุภาคซีเฝ้า์แอลบที่เติมลงไปจะคอยขัดขวางการไหลของอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทำให้การเสื่อมเสถียรภาพของโครงสร้างโฟมเกิดขึ้นช้าลง จึงทำให้ได้โครงสร้างโฟมที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของโฟมที่ผสมอนุภาคซีเฝ้า์แอลบที่มีขนาดอนุภาคเท่ากัน พบว่าขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยของโฟมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคซีเฝ้า์แอลบเพิ่มขึ้น แต่ขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยยังคงเล็กกว่าขนาดโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ การเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคซีเฝ้า์แอลบส่งผลให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวมีความหนืดเพิ่มขึ้น โพรงอากาศแต่ละโพรงจึงสามารถกักเก็บแก๊ส H_2 ได้นานขึ้นก่อนเกิดการรวมตัวกันของโพรงอากาศ ส่งผลให้สุดท้ายแล้วได้โฟมที่มีโพรงอากาศที่มีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้น

สำหรับโครงสร้างของโพลีที่ผสมอนุภาคซิลิกาไม่พบเนื้อโลหะรวมตัวกันที่บริเวณฐานโพลี และมีโพรงอากาศกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับโครงสร้างของโพลีผสมอนุภาคซีดีแคบ นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มของขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคซิลิกาเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับโพลีที่ผสมอนุภาคซีดีแคบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนืดอะลูมิเนียมหลอมเหลวเมื่อปริมาณอนุภาคซิลิกาในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพิ่มขึ้น

โพลีที่ผสมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ มีโครงสร้างโพลีที่มีความสม่ำเสมอและไม่พบเนื้อโลหะรวมตัวกันที่บริเวณฐานโพลี ในโครงสร้างมีโพรงอากาศที่มีแนวโน้มของขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างของโพลีที่ผสมอนุภาคซีดีแคบทุกส่วนผสม ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากคุณสมบัติด้านการเปียกที่ดีของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้การเพิ่มขึ้นของความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้มีการรวมตัวกันของโพรงอากาศขนาดเล็กกลายเป็นโพรงอากาศขนาดใหญ่เพียงเล็กน้อย จึงพบว่าภายในโครงสร้างโพลีมีจำนวนโพรงอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคมากขึ้น

5.2.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อโครงสร้างโพลี

เมื่อพิจารณาโพลีที่ผสมอนุภาคซีดีแคบทุกชนิด [RHA [HCl], RHA [H₂SO₄]) ที่ปริมาณอนุภาคเท่ากัน พบว่าโครงสร้างโพลีมีแนวโน้มของขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคซีดีแคบมีขนาดเล็กลง เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมของอนุภาคซีดีแคบที่เท่ากัน อนุภาคขนาดเล็กจะมีจำนวนอนุภาคมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคซีดีแคบกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพิ่มขึ้นดังได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้ความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพิ่มขึ้นมาก ส่งผลให้โพรงอากาศเกิดการพังตัวของผนังโพรงอากาศได้ยาก ทำให้โพลีสามารถขยายตัวได้มากขึ้น

รูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นบริเวณผิวของผนังโพรงอากาศของโพลี เมื่อมีการผสมอนุภาคซีดีแคบลงไป โพลีผนังโพรงอากาศจะมีลักษณะขรุขระมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผนังโพรงอากาศของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ การที่ผิวของโพรงอากาศมีลักษณะขรุขระขึ้นเนื่องจากการปรากฏของอนุภาคซีดีแคบบนผิว โดยมีบางส่วนของอนุภาคฝังอยู่ในเนื้อโลหะ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปียกที่ไม่ดีของอนุภาคซีดีแคบ การยับยั้งการบางลงของผนังโพรงอากาศจะมีมากขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคซีดีแคบโตขึ้น สำหรับอนุภาคซีดีแคบที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผนังโพรงอากาศและผนัง Plateau border ได้มากกว่าอนุภาคซีดีแคบที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเห็นได้ชัดจากรูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border ในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ จะเห็นว่าบริเวณที่มีอนุภาคซีดีแคบขนาดใหญ่ฝังตัวอยู่ ผนังโพรงอากาศบริเวณนั้นจะหนาแน่นกว่าบริเวณที่มีอนุภาคซีดีแคบ

ขนาดเล็กฝังตัวอยู่ ดังนั้นการยับยั้งการบางลงของผนัง โพรงอากาศน่าจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีอนุภาค ซิลิกาเคลือบขนาดใหญ่ฝังตัวอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับแก๊ส ซึ่งอาจทำให้เกิดการรวมตัวกันของโพรงอากาศได้ยากขึ้น แต่เนื่องจากที่ปริมาณสัดส่วนการผสมอนุภาคของซิลิกาเคลือบเท่ากัน ซิลิกาเคลือบขนาดเล็กมีจำนวนอนุภาคมากกว่าซิลิกาเคลือบขนาดใหญ่จึงทำให้เห็นความแตกต่างของขนาดโพรงอากาศในโครงสร้างได้ไม่ชัดเจน

5.2.3 ผลของประเภทของอนุภาคต่อโครงสร้างโฟม

จากการศึกษาเปรียบเทียบ โครงสร้างของโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกาเคลือบทั้งสามชนิด (RHA [HCl], RHA [H₂SO₄], RHA [Power plant]) พบว่าที่ขนาดและปริมาณของอนุภาคซิลิกาเคลือบเท่ากัน โฟมจะมีโครงสร้างที่คล้ายกัน และโครงสร้างที่ได้ก็มีความสม่ำเสมอว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทั้งสิ้น

สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกา พบว่ามีโครงสร้างโฟมที่มีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยเล็กกว่าโฟมผสมอนุภาคซิลิกาเคลือบ ที่ปริมาณของอนุภาคเท่ากัน การที่อนุภาคซิลิกามีขนาดเล็กกว่าอนุภาคซิลิกาเคลือบมาก เมื่อเกิดการบางลงของผนังโพรงอากาศในขณะที่โฟมเกิดการขยายตัว ความหนาของผนังโพรงอากาศก่อนเกิดการพังตัวของโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกาจะบางกว่าโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกาเคลือบ โพรงอากาศขนาดเล็กจึงเกิดการรวมตัวกันได้ยากขึ้น ทำให้ได้โครงสร้างโฟมที่มีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยเล็กกว่าโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกาเคลือบ

สำหรับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์นั้น เป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติด้านการเปียกในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ดีซึ่งแตกต่างจากอนุภาคซิลิกาเคลือบและอนุภาคซิลิกา ทำให้มีความแตกต่างกันในเรื่องความสามารถในการเพิ่มความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลว การเพิ่มความหนืดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ดีนั้น จะต้องมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีด้วยจึงทำให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวมีความหนืดที่สม่ำเสมอ [24]

นอกจากนี้ความสามารถในการเปียกของอนุภาคแต่ละชนิดยังมีผลต่อการยับยั้งการเกิดการเสื่อมเสถียรภาพของโครงสร้างโฟมไม่เหมือนกัน จากความสัมพันธ์ของสมการของยัง (Young's equation) สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติการเปียกของอนุภาคได้โดยดูจากมุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างผิวของของแข็งกับของเหลว จากความสัมพันธ์

$$\gamma_s = \gamma_{s/l} + \gamma_s \cdot \cos \theta \quad (1)$$

จากทฤษฎีของ Liquid droplet entrainment [35] การลอยของอนุภาคในของเหลวจะเกิดขึ้นได้เมื่อเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\gamma_l + \gamma_{s/l} > \gamma_s \quad (2)$$

โดยที่ γ_s = แรงตึงผิวของของแข็ง (Surface tension of solid)
 γ_l = แรงตึงผิวของของเหลว (Surface tension of liquid)
 $\gamma_{s/l}$ = แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลว (Interfacial tension between the solid and liquid)

เมื่อนำสมการที่ (1) แทนที่ในสมการที่ (2) จะได้

$$\gamma_l > \gamma_s \cos \theta \quad (\theta > 0) \quad (3)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (3) แสดงว่า อนุภาคของแข็งจะสามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำโลหะหลอมเหลวและแก๊สได้ อนุภาคนั้นต้องไม่แสดงคุณสมบัติการเปียกโดยสมบูรณ์ในของเหลว จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขี้เถ้าเคลบส่วนใหญ่เคลื่อนไปอยู่บริเวณขอบของผนังโพรงอากาศและขอบของ Plateau border จนอนุภาคขี้เถ้าเคลบ ไพล้ออกจากเนื้ออะลูมิเนียมขึ้นมา อันเป็นผลมาจากคุณสมบัติด้านความสามารถในการเปียกของอนุภาคขี้เถ้าเคลบในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ไม่ดี อนุภาคขี้เถ้าเคลบจึงถูกผลักออกจากเนื้อของอะลูมิเนียมไปในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับแก๊ส [24] โดยจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นสำหรับขี้เถ้าเคลบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

5.3 คุณสมบัติทางกลของโฟม

5.3.1 ผลของปริมาณอนุภาคต่อสมบัติทางกลของโฟม

การทดสอบสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมนิยมทดสอบ โดยการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของโฟมคือ ความหนาแน่นของโฟม งานวิจัยนี้จึงมีการควบคุมค่าความหนาแน่นของโฟมที่ใช้ทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดให้อยู่ในช่วง $0.6 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ เนื่องจากในกระบวนการผลิต โฟมอะลูมิเนียมสามารถควบคุมค่าความหนาแน่นของโฟมที่ผลิตออกมาได้ยาก จึงทำให้มีจำนวนชิ้นงานทดสอบในแต่ละส่วนผสมไม่มาก จากผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24 พบว่าโฟมที่มีการเติมอนุภาคขี้เถ้าเคลบทุกส่วนผสมมีค่าความแข็งแรงอัดและค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานมากกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นโครงสร้างของโฟมที่ผสมอนุภาคขี้เถ้าเคลบซึ่งมี

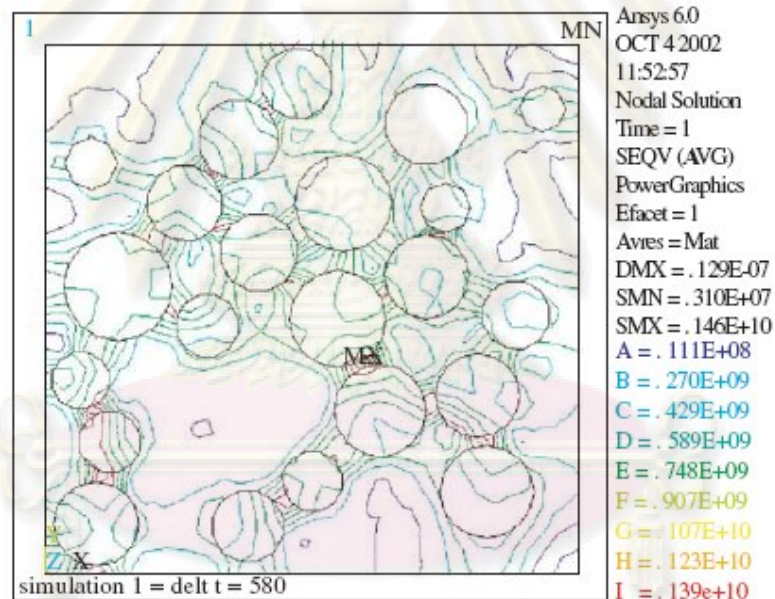
โพรงอากาศกระจายตัวอย่างความสม่ำเสมอมากกว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทำให้เมื่อโครงสร้างรับแรงจะมีการกระจายแรงไปบริเวณใกล้เคียงได้ดี โดยบริเวณที่มีการกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอจะเป็นจุดอ่อนของโครงสร้าง โดยโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเสียหายก่อนโพรงอากาศขนาดเล็กกว่าที่อยู่บริเวณใกล้เคียง เนื่องจากมีการถ่ายเทแรงไปบริเวณใกล้เคียงได้ไม่ดี ดังนั้นโครงสร้างโฟมที่มีการกระจายตัวของโพรงอากาศที่ดี โฟมก็จะมีความแข็งแรงมากขึ้น

สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน แนวโน้มของค่าความแข็งแรงอัดและค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณของอนุภาคซีเถ้าเคลบเพิ่มขึ้น จากที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่าเมื่อเติมอนุภาคเซรามิกปริมาณมากขึ้นทำให้โพรงอากาศภายในโครงสร้างโฟมมีขนาดโตขึ้น [35] สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบ เมื่อปริมาณของอนุภาคซีเถ้าเคลบเพิ่มขึ้นโพรงอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นประกอบกับโฟมสามารถขยายตัวได้น้อยลงนั้น ทำให้โฟมมีทั้งโพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่และผนังโพรงอากาศที่หนาขึ้น จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าโฟมมีจำนวนโพรงอากาศและค่า Area fraction ลดลงเมื่อปริมาณของซีเถ้าเคลบเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการลดลงของปริมาณรูพรุนภายในโครงสร้างโฟมเมื่อโฟมผสมซีเถ้าเคลบมากขึ้น เมื่อโฟมมีปริมาณรูพรุนภายในโครงสร้างลดลง โฟมจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [23] เนื่องจากมีพื้นที่บริเวณที่เป็นเนื้อโลหะภายในผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border มีมากขึ้น จึงส่งผลให้ผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border สามารถรองรับแรงกระทำต่อพื้นที่ได้สูงขึ้น จึงทำให้โครงสร้างโดยรวมของโฟมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซิลิกาจะเห็นว่าโฟมมีการขยายตัวลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคซิลิกาเพิ่มขึ้นและมีจำนวนโพรงอากาศกับค่า Area fraction ลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น แสดงว่าโฟมมีปริมาณรูพรุนภายในโครงสร้างน้อยลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้โฟมผสมซิลิกามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อผสมอนุภาคซิลิกามากขึ้น โฟมที่ผสมซีเถ้าเคลบกับโฟมที่ผสมซิลิกามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงเหมือนกันเมื่อผสมอนุภาคปริมาณมากขึ้น แต่สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมทั้งสองชนิดไม่เท่ากัน โดยที่โฟมผสมซิลิกามีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงน้อยกว่าโฟมที่ผสมซีเถ้าเคลบ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากการลดลงของจำนวนโพรงอากาศและค่า Area fraction ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 เป็นการแสดงถึงการลดลงของปริมาณรูพรุนภายในที่ต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของโครงสร้างโฟมที่ผสมอนุภาคทั้งสองชนิด ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงอัดและค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์จะมีเหตุผลที่แตกต่างกับโฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบ ในขณะที่โฟมมีการ

ขยายตัวมากขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้น การมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นของโฟมผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นผลมาจากภายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ดีทั้งภายในเนื้ออะลูมิเนียมและบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับแก๊ส เมื่อโครงสร้างได้รับแรง ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อพื้นบริเวณผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border ส่วนใหญ่จะไปอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคกับเนื้อพื้น ดังตัวอย่างแบบจำลองที่แสดงในรูปที่ 5.1 ด้วยสมบัติของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความสามารถในการเปื่อยที่ต่ำจึงทำให้ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์กับอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงมากกว่าผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคซีเถ้าแอลกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ประกอบกับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความแข็งสูงกว่าอนุภาคซีเถ้าแอล ส่งผลให้เนื้อพื้นอะลูมิเนียมที่มีอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่สามารถรับความเค้นได้มากกว่า โครงสร้างโดยรวมของโฟมที่ผสมซิลิกอนคาร์ไบด์จึงสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการรับแรงของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในเนื้ออะลูมิเนียม [37]

5.3.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อสมบัติทางกลของโฟม

จากการเปรียบเทียบโฟมผสมอนุภาคซีเถ้าแอลทุกส่วนผสมที่มีปริมาณอนุภาคเท่ากัน ค่าความแข็งแรงอัดและค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของโฟมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคซีเถ้าแอลมีขนาดเล็กลง เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาคของผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border ของโฟมที่ผสมซีเถ้าแอลแล้วจะพบว่า ลักษณะการฝังตัวของอนุภาคซีเถ้า

แคลบภายในเนื้ออะลูมิเนียมมีบางส่วนของอนุภาคโพลีออกไซด์จากเนื้ออะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 เนื่องจากคุณสมบัติด้านความสามารถในการเปียกของซีเมนต์แคลบในอะลูมิเนียม หลอมเหลวที่ไม่ดี อนุภาคซีเมนต์แคลบส่วนใหญ่จึงเคลื่อนที่ไปอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะ กับแก๊ส เมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวแข็งตัวจึงพบบางส่วนของอนุภาคซีเมนต์แคลบโพลีออกไซด์จากเนื้อ อะลูมิเนียม โดยจะเห็นได้ชัดเจนมากในโพมที่ผสมซีเมนต์แคลบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ การที่บริเวณ ผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border มีอนุภาคซีเมนต์แคลบโพลีออกไซด์จากเนื้อพื้นในลักษณะนี้ ทำให้ผนังโพรงอากาศและบริเวณ Plateau border ในบริเวณนั้นมีผิวที่ไม่สม่ำเสมอประกอบกับ ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมกับผิวอนุภาคซีเมนต์แคลบที่ไม่ดี ทำให้บริเวณ ดังกล่าวสามารถรับแรงได้น้อยลง ส่วนโพมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์แคลบขนาดเล็กมีโครงสร้างที่มี อนุภาคส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับแก๊ส และกระจายตัวได้ดีกว่า อนุภาคซีเมนต์แคลบขนาดใหญ่ ทำให้บริเวณผนังโพรงอากาศและ Plateau border มีผิวที่สม่ำเสมอ มากกว่า ส่งผลต่อการกระจายแรงที่ดีในบริเวณผนังโพรงอากาศและ Plateau border เมื่อโครงสร้าง โพมได้รับแรง ดังนั้น โครงสร้างโดยรวมของโพมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์แคลบขนาดเล็กจะมีความ แข็งแรงสูงกว่าโพมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์แคลบขนาดใหญ่

5.3.3 ผลของประเภทอนุภาคต่อสมบัติทางกลของโพม

โพมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์แคลบที่ได้จากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน (RHA [HCl], RHA [H₂SO₄], RHA [Power plant]) ที่ขนาดและปริมาณของอนุภาคใกล้เคียงกัน ความแข็งแรงของ โพมจะมีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากโพมทั้งสามชนิดต่างก็มีความสามารถในการขยายตัว และโครงสร้างโพมที่คล้ายคลึงกัน

สำหรับโพมที่ผสมอนุภาคซิลิกา นั้น โดยรวมแล้วโพมผสมอนุภาคซิลิกาจะมีความ แข็งแรงสูงกว่าโพมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์แคลบเล็กน้อย นอกเหนือจากโครงสร้างโพมที่ใกล้เคียงกัน สาเหตุอื่นที่เป็นไปได้ ได้แก่ ลักษณะรูปร่างของอนุภาคซิลิกา ที่มีผิวเรียบ ทำให้การยึดติดกับเนื้อ อะลูมิเนียมแน่นดีกว่าในกรณีของซีเมนต์แคลบ นอกจากนี้ความแข็งแรงของอนุภาคเองก็น่าจะมีผล เนื่องจากอนุภาคซิลิกามีความแข็งแรงสูงกว่าอนุภาคซีเมนต์แคลบ โดยอาจเปรียบเทียบได้จากค่าความ หนาแน่นของอนุภาคแต่ละชนิด อนุภาคซิลิกามีความหนาแน่นประมาณ 2.20 g/cm³ และอนุภาค ซีเมนต์แคลบมีความหนาแน่นประมาณ 1.938 g/cm³ [26] ความสามารถในการรับแรงของอนุภาคทั้ง สองแบบจึงแตกต่างกัน ดังนั้นเนื้อพื้นอะลูมิเนียมที่มีอนุภาคซิลิกากระจายตัวอยู่จะสามารถรับแรง ก่อนเกิดการพังตัวของโครงสร้างได้สูงกว่าโพมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์แคลบ

ส่วนโพมที่ผสมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์นั้นมีความแข็งแรงอัดและความสามารถในการ ดูดซับพลังงานสูงกว่าโพมที่ผสมอนุภาคซีเมนต์แคลบทุกส่วนผสม เนื่องจากคุณสมบัติด้านการ

เปียกในอะลูมิเนียมหลอมเหลวของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่คืนัน ทำให้ความแข็งแรงระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์กับเนื้อพื้นอะลูมิเนียมมีมากกว่าผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคซีเถ้าเคลือบกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียม จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างโคมทั้งสองชนิดแตกต่างกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณ ขนาดและประเภทของอนุภาคซีเถ้าเคลบต่อพฤติกรรมการขยายตัว โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม รวมทั้งพฤติกรรมการรับแรงอัดของ โฟมอะลูมิเนียม

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบทุกส่วนผสมมีการขยายตัวสูงสุดน้อยกว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และสามารถขยายตัวได้น้อยลงเมื่อปริมาณอนุภาคซีเถ้าเคลบเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 3 wt.% ที่ขนาดอนุภาคซีเถ้าเคลบเท่ากัน
2. โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบปริมาณเท่ากัน จะขยายตัวได้น้อยลงเมื่อผสมซีเถ้าเคลบที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง
3. โครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบทุกส่วนผสม มีการกระจายตัวของโพรงอากาศที่สม่ำเสมอกว่าโครงสร้างของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์
4. สำหรับโฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบขนาดใกล้เคียงกัน โฟมจะมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณของอนุภาคซีเถ้าเคลบเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 3 wt.%
5. เมื่อปริมาณของอนุภาคซีเถ้าเคลบเท่ากัน โฟมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบจะมีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของอนุภาคซีเถ้าเคลบใหญ่ขึ้น
6. โฟมอะลูมิเนียมที่ผสมอนุภาคซีเถ้าเคลบทุกส่วนผสมมีค่าความแข็งแรงอัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมจะมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคเพิ่มขึ้น
7. ที่ปริมาณอนุภาคซีเถ้าเคลบเท่ากัน โฟมจะมีความแข็งแรงอัดและค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคซีเถ้าเคลบมีขนาดเล็กลง
8. ที่ขนาดและปริมาณของอนุภาคเท่ากัน การใช้อนุภาคซีเถ้าเคลบที่ได้จากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มเสถียรภาพของโฟมอะลูมิเนียม

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่ผสมซีเมนต์แล้วเคลือบ โดยมีการลดขนาดของซีเมนต์เคลือบด้วยการบดซีเมนต์เคลือบด้วยครกบดสาร ทำให้ได้ซีเมนต์เคลือบที่มีขนาดเล็กในระดับหนึ่ง เมื่อทำการผลิตโฟมอะลูมิเนียมผสมซีเมนต์เคลือบด้วยกรรมวิธี โลหะผงแล้วพบว่า ได้รับผลกระทบจากรูปร่างของซีเมนต์เคลือบที่แตกต่างไปจากอนุภาคเซรามิกชนิดอื่นที่นิยมใช้กันทั่วไปในการเพิ่มเสถียรภาพของโฟม จึงทำให้มีความสามารถในการอัดตัวกับผงอะลูมิเนียมไม่ดี การลดขนาดของซีเมนต์เคลือบให้มีขนาดเล็กมากกว่าขนาดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อาจช่วยลดเพิ่มความสามารถในการอัดตัวกับผงอะลูมิเนียมของอนุภาคซีเมนต์เคลือบให้ดีขึ้นได้

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างโฟมด้วยโปรแกรม Image J มีข้อจำกัดอยู่ที่คุณภาพของรูปโครงสร้างโฟมที่ได้มาจากการสแกน ถ้ารูปมีความสว่างไม่เหมาะสมก็ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ ทำให้ต้องมีการปรับแต่งรูปภาพให้ชัดเจนยิ่งขึ้นทีละรูปก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ซึ่งทำให้ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน ดังนั้นการเตรียมโฟมให้โครงสร้างที่ชัดเจนและการสแกนโครงสร้างโฟมด้วยเครื่องสแกนที่มีคุณภาพสูงจะทำให้ได้รูปโครงสร้างที่มีคุณภาพสูงและสามารถนำรูปมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการแต่งรูปก่อนจะสามารถลดเวลาการวิเคราะห์ได้มากขึ้น

การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธี โลหะผงนั้น มีข้อจำกัดอยู่ในด้านการผลิตซ้ำ (Reproducibility) ของโฟมอะลูมิเนียมที่ทำได้ค่อนข้างยาก ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโฟมจึงแสดงแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ถ้าสามารถควบคุมการผลิตโฟมให้ได้โฟมที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันได้ จะทำให้การศึกษาสมบัติต่างๆของโฟมมีความชัดเจนยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] M.F.Ashby, A.Evans, N.A.Fleck, L.J.Gibson, J.W.Hutchinson and H.N.G.Wadley. Metal Foams A Design Guide. USA : Butterworth-Heinemann. 2000.
- [2] S.Asavavisithchai. Production of Aluminium Foam by Powder Metallurgical Route. Nottingham. (2001). (Unpublished Manuscript).
- [3] J.Banhart. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science 46 (2001) : 559-632.
- [4] F.Simansik, W.Rajner and R.Laag. Alulight-aluminium foam for lightweight construction. SAE Technical Paper. (2000-01) : 337
- [5] L.Gibson and M.Ashby. Cellular Solids, Structure and Properties. 2nd edition. Cambridge University Press. 1997.
- [6] F.Baumgartner, I.Duarte and J.Banhart. Advanced Engineering Materials 2. (2000) : 168.
- [7] J.Baumeister. German Patent DE. 40. 18. (1990) : 360.
- [8] J.Banhart. Europhys. News. 30. (1999) : 17.
- [9] A.R.Kennedy and S.Asavavisithchai. Foaming of compacted Al-TiH₂ powder mixtures. Materials Science 396-402 (2002) : 251-258.
- [10] A.R.Kennedy. The effect of compaction on expansion and gas release in Al-TiH₂ powder compacts. Materials Science 416 (2003) : 299-304.
- [11] I.Duarte and J.Banhart. A study of aluminium foam formation-kinetics and Microstructure. Acta Materialia 48 (2000) : 2349-2362.
- [12] N.Babcsan, D.Leitmeier and H.P.Degischer. Foamability of particle reinforced aluminium melt. Mat.-wiss. U. Werkstofftech 34 (2003) : 22-29.
- [13] F.Von Zeppelin, M.Hirscher, H.Stanzick and J.Banhart. Desorption of hydrogen from blowing agents used for foaming metals. Composites Science and Technology 63 (2003) : 2293-2300.
- [14] A.R.Kennedy. The effect of TiH₂ heat treatment on gas release and foaming in Al- TiH₂ preforms. Scripta Materialia 47 (2002) : 763-767.
- [15] S.W.Youn and C.G.Kang. 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.

- [16] V.Gergely, H.P.Degischer and T.W.Clyne. Recycling of MMCs and production of metallic foams. ComprehensivemComposite Materials 3 (2000) : 1-24.
- [17] Th.Wubben, H.Stanzick, J.Banhart and S.Odenbach. Stability of metallic foams studied under microgravity. Journal of Physics: Condensed Matter 15 (2003) : 427-433.
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam
- [19] F.Simancik, K.Behulova, and L.Bors. Effect of ambient atmosphere on metal foam expansion. Proceeding of the 2nd International Conference on Cellular Metal and Metal Foaming Technology MIT-Verlag. Bremen. (2001) : 89-92.
- [20] K.R.Van Horn. Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams Aluminium. American Society for Metals. 1 (1967).
- [21] B. Huko and L.Faria. Material model of metallic cellular solids. Computers&Structures 62 Issue 6 (1997) : 1049-1057.
- [22] A.E.Makaki and T.W.Clyne. The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium melt. Acta Materialia 49 Issue 9 (2001) : 1677-1686.
- [23] W.Bin, H.Deping, and S.Guangji. Compressive properties and energy absorption of foamed Al alloy. Processing of the 2nd International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology MIT-Verlag. Bremen. (2001) : 351-354.
- [24] S.W.Ip, Y.Wang and J.M.Toguri. Aluminium foam stabilization by solid particles. Canadian Metallurgical Quarterly 38 (1999) : 81-92.
- [25] R.V.Krishnarao, J.Subrahmanyam, T.Jagadish Kumar. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. Journal of the European Ceramic Society 21 (2001) : 99-104.
- [26] N.Yalcin, V.Sevinc. Studies on Silica Obtained from Rice Husk. Ceramic International 27 (2001) : 219-224.
- [27] T.H.Liou. Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk. Material Science and Engineering A 364 Issue 1-2 (2004) : 313-323.
- [28] C.Real, M.D.Alcala and J.M.Criado. Preparation of Silica from Rice Husks. J.Am.Ceram.Soc 79 Issue 8 (1990) : 2012-2016.
- [29] Y.Shinohara and N.Kohyama. Quantitative Analysis of Tridymite and Cristobalite Crystallized in Rice Husk Ash by Heating. Industrial Health 42 No.2 (2004) : 277-285.

- [30] L.J.Gibson. Mechanical Behavior of Metallic Foams. Annu. Rev. Mater. Sci 30 (2000) : 191-227.
- [31] F.Simancik, A.P.Philip, A.Parrish and H.N.G.Wadley. Porous and Cellular Materials for Structural Applications. MRS. San Francisco. CA. (1998) : 205-210.
- [32] F.Han, Z.Zhu and J.Gao. Compressive Deformation and Energy Absorbing Characteristic of Foamed Aluminium. Metallurgical and Materials Transactions A 29A 198-2497.
- [33] E.Andrews, W.Sanders and L.J.Gibson. Compressive and tensile behavior of aluminum foams. Materials Science and Engineering A 270 (1999) : 113–124.
- [34] A.R.Kennedy and S.Asavavisithchai. Effects of TiB_2 particle addition on the expansion, structure and mechanical properties of PM Al foams. Scripta Materialia 50 (2004) : 115-119.
- [35] W.Deqing and S.Ziyuan. Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam. Materials Science and Engineering A 361 (2003) : 45-49.
- [36] S.Esmaeelzadeh, A.Simchi and D.Lehmhus. Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi7 foam. Materials Science and Engineering A 424 (2006) 290-299.
- [37] Z.M.Boari, W.A.Monteiro and C.A.Jesus Miranda. Mathematical model predicts the elastic behavior of composite materials. Materials Research 8 (2005) : 99-103.
- [38] S.Elbir, S.Yilmaz, A.K.Toksoy, M.Guden and I.W.Hall. SiC-paticulate aluminum composite foams produced from powder compacts: foaming and compression behavior. J Master Sci 41 (2006) : 4075-4084.
- [39] P.Shen, H.Fujii, T.Matsumoto and K.Nogi. Reactive wetting of SiO_2 substrates by molten Al. Metallurgical and Materials Transactions A. 35A (2004) : 583-588.
- [40] S.Chandrasekhar, K.G.Satyanarayana, P.N.Pramada and P.Raghavan. Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk. Materials science 38 (2003) : 3159-3168.
- [41] V.Laurent, D. Chatain and N.Eustathopoulos. Wettability of SiO_2 and oxidized SiC by aluminium. Material science and Engineering A 135 (1991) : 89-94.

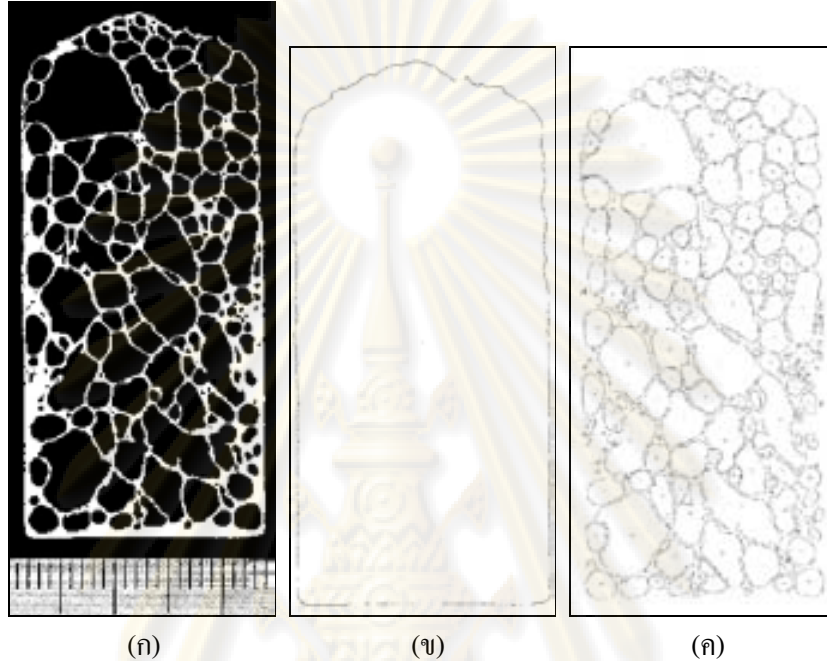


ภาคผนวก

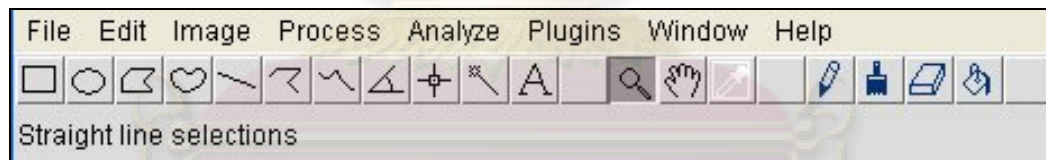
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์รูปโครงสร้างด้วยโปรแกรม Image J



รูปที่ 1ก แสดงผลวิเคราะห์รูปโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมด้วยโปรแกรม Image J

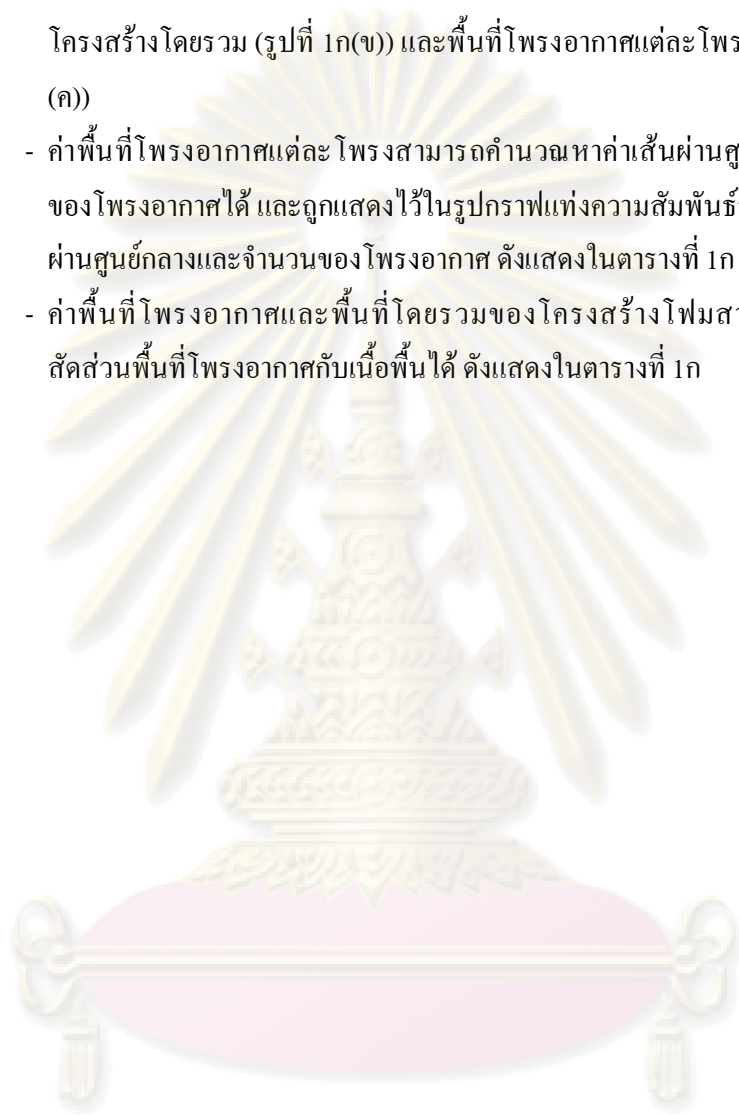


รูปที่ 2ก แสดงลักษณะของหน้าต่างโปรแกรม Image J 1.36b

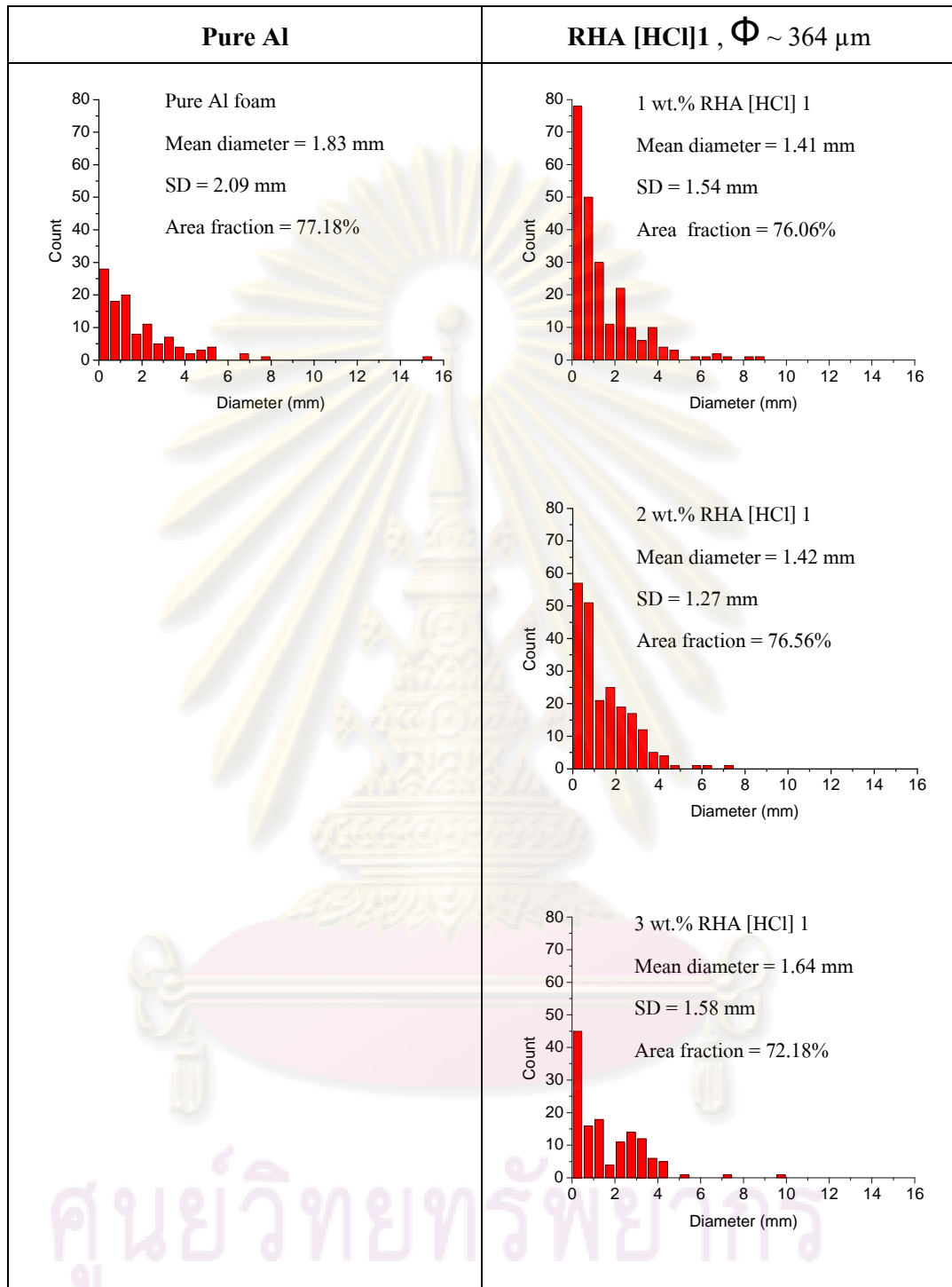
การวิเคราะห์รูปโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J เวอร์ชัน 1.36b โดยรูปที่จะทำการวิเคราะห์ต้องใช้รูปที่มีนามสกุล .BMP ดังรูปที่ 1ก(ก) การวิเคราะห์รูปมีขั้นตอนดังนี้

- เปิดโปรแกรม Image J 1.36b ขึ้นมา โดยโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 2ก
- ทำการตั้งค่าสเกลในโปรแกรมให้ตรงกับสเกลในรูปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูป โดยเข้าไปที่ Analyze > Set scale
- ทำการ Crop รูปเฉพาะบริเวณที่ต้องการทำการวิเคราะห์
- เปลี่ยนชนิดของรูปจาก RGB เป็น 8-bit
- ปรับความชัดของรูปภาพโดยใช้คำสั่ง Image > Adjust > Threshold

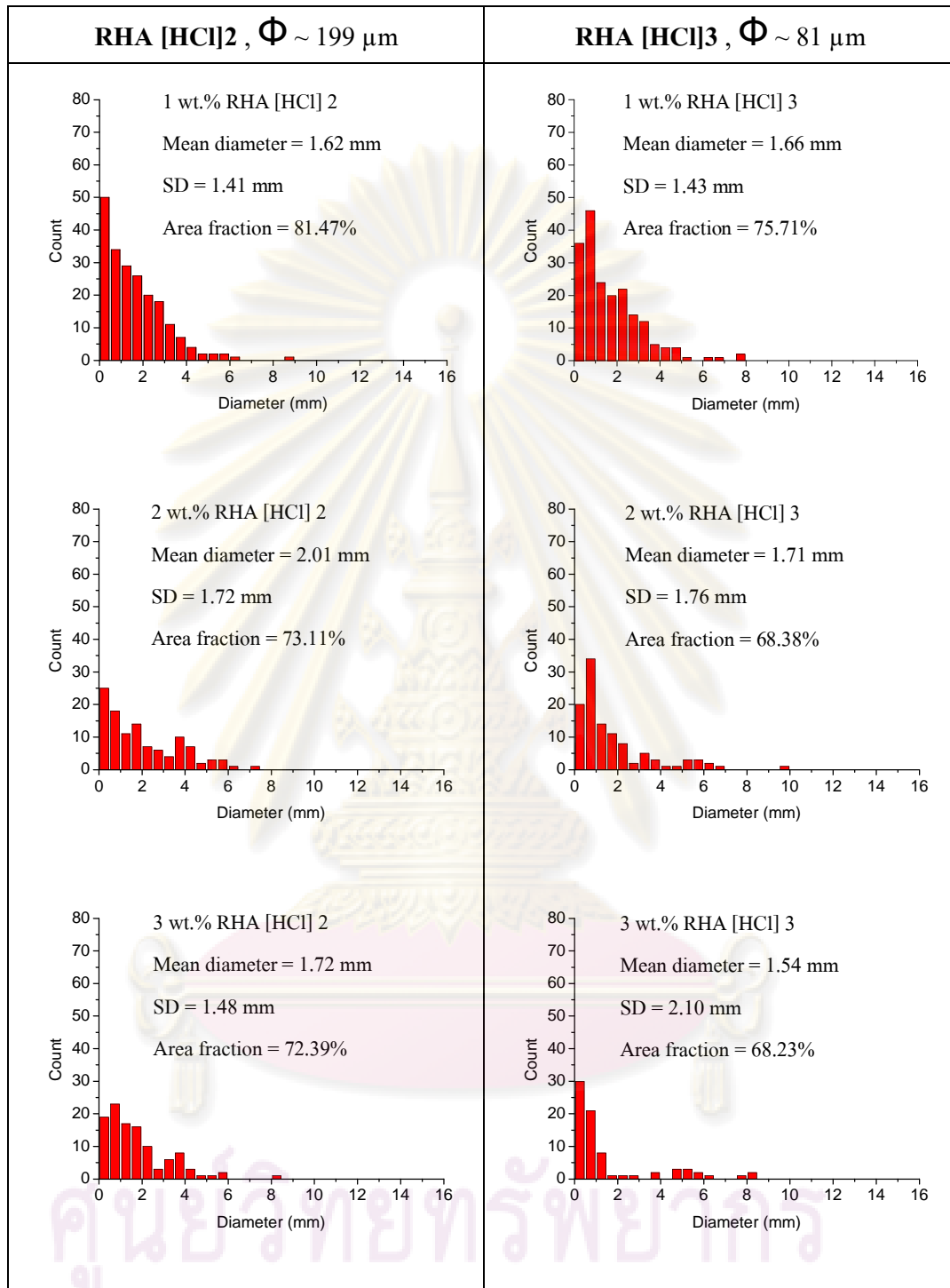
- ทำการวิเคราะห์รูปด้วยคำสั่ง Analyze > Analyze particle โดยกำหนดขนาดพื้นที่ที่ต้องการวิเคราะห์ให้อยู่ในช่วง 0.0001 – Infinity cm² ผลการวิเคราะห์จะแสดงออกเป็นค่าพื้นที่โดยแสดงขอบเขตของพื้นที่ที่วิเคราะห์เป็นเส้น ซึ่งแสดงทั้งพื้นที่โครงสร้างโดยรวม (รูปที่ 1ก(ข)) และพื้นที่โพรงอากาศแต่ละโพรงอากาศ (รูปที่ 1ก(ค))
- ค่าพื้นที่โพรงอากาศแต่ละโพรงสามารถคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของโพรงอากาศได้ และถูกแสดงไว้ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนของโพรงอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 1ก
- ค่าพื้นที่โพรงอากาศและพื้นที่โดยรวมของโครงสร้างโพรสามารถคำนวณหาสัดส่วนพื้นที่โพรงอากาศกับเนื้อพื้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 1ก



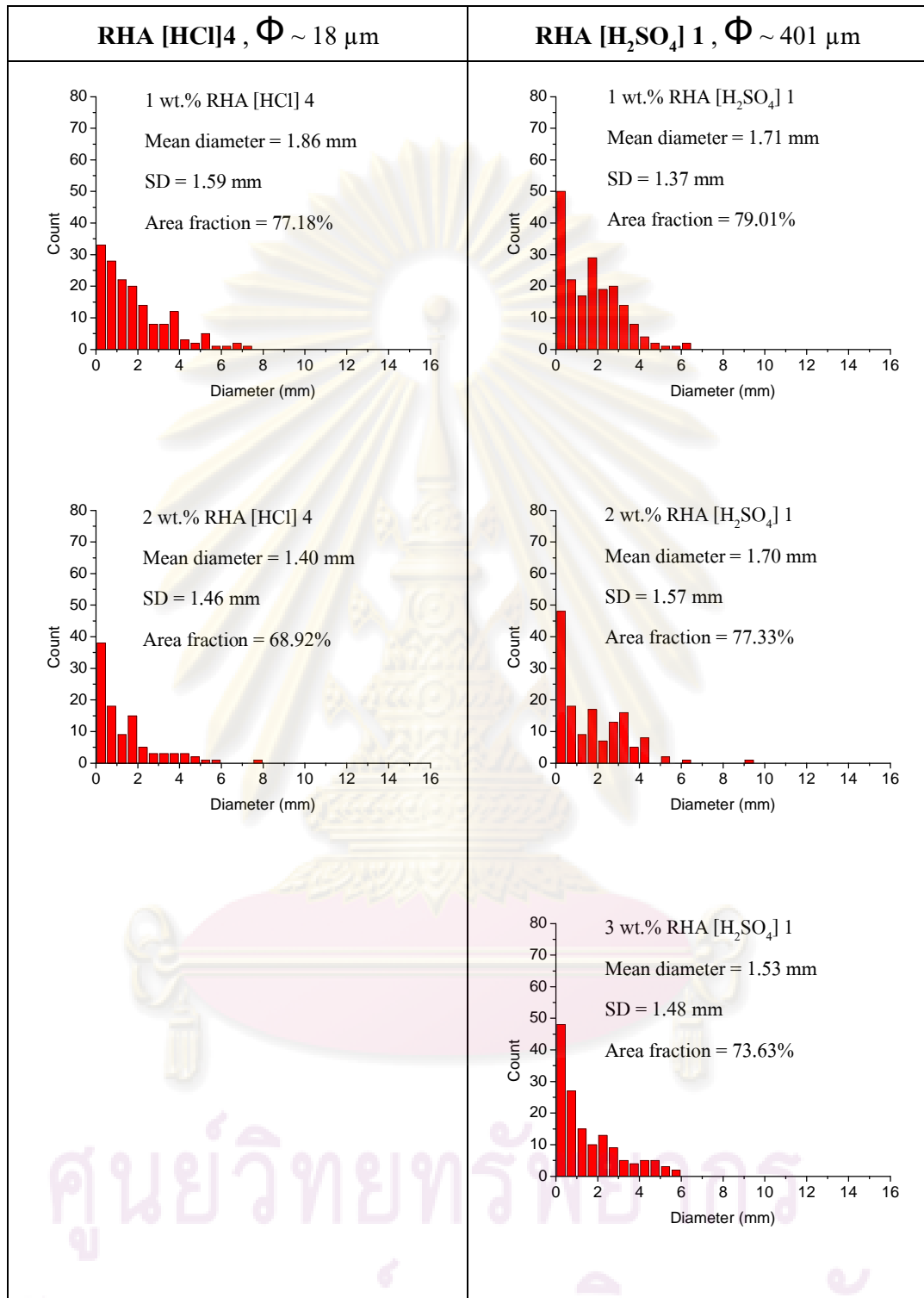
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



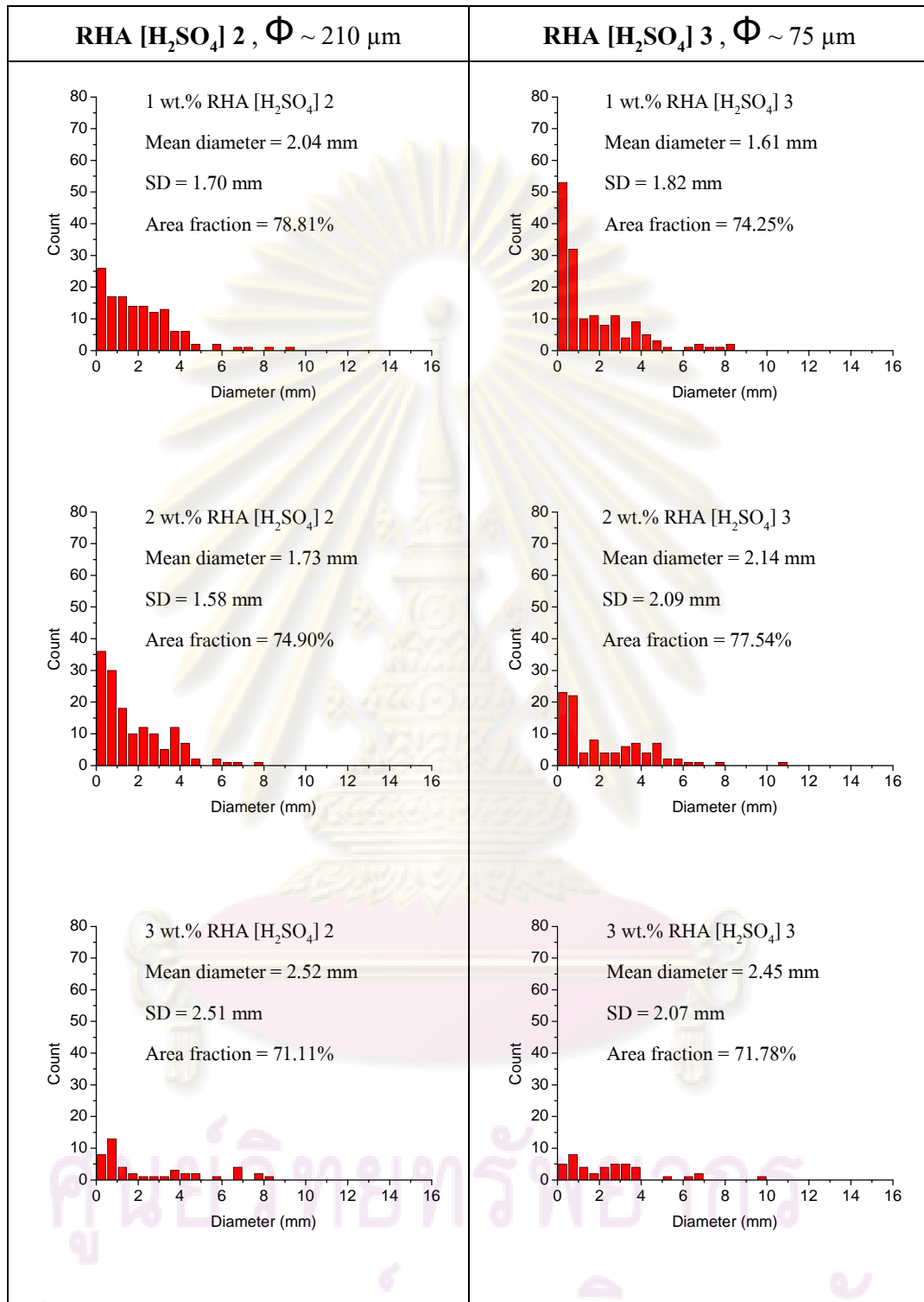
ตารางที่ 1ก แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโฟมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมต่างๆ



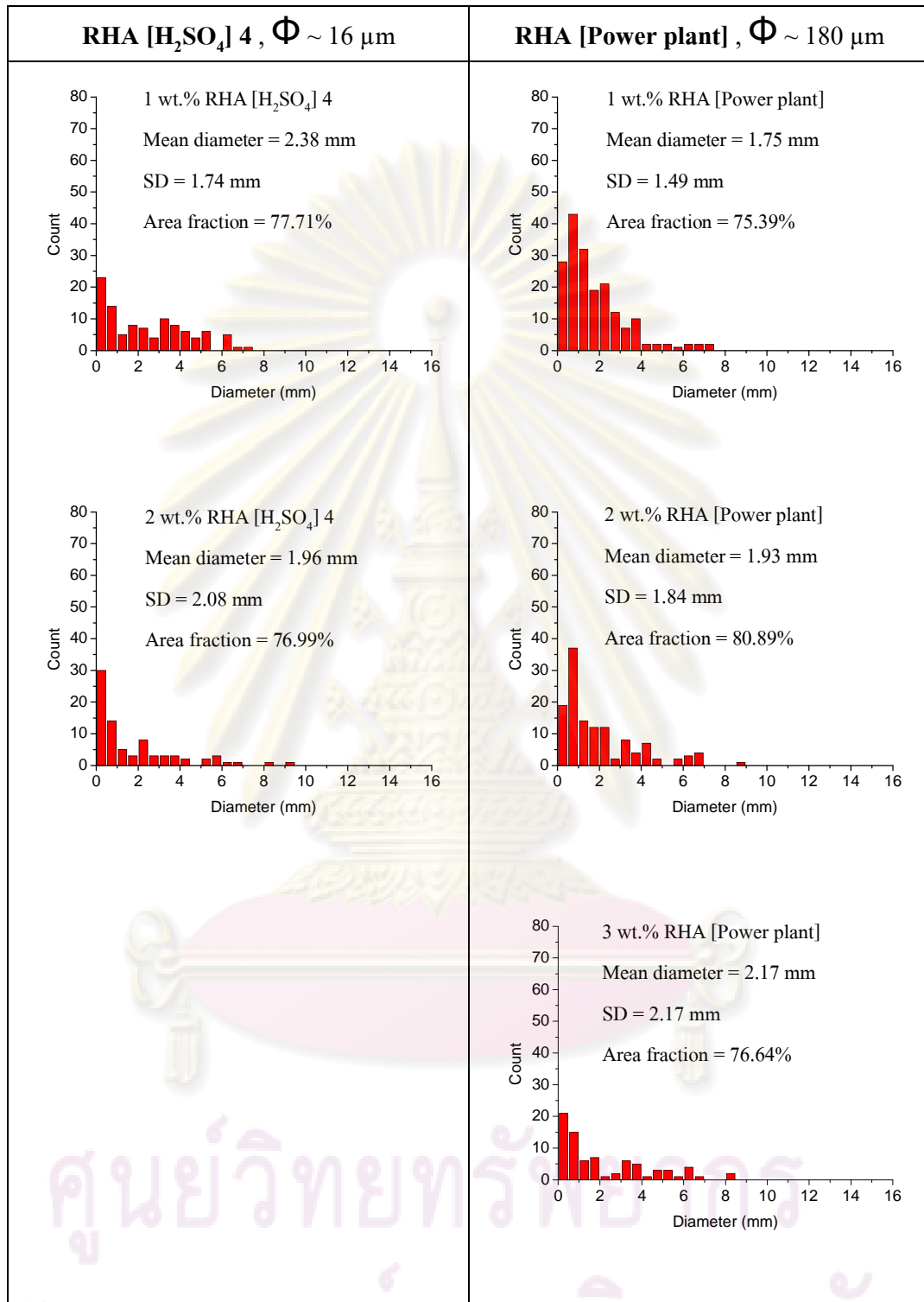
ตารางที่ 1ก (ต่อ) แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโม่อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมต่างๆ



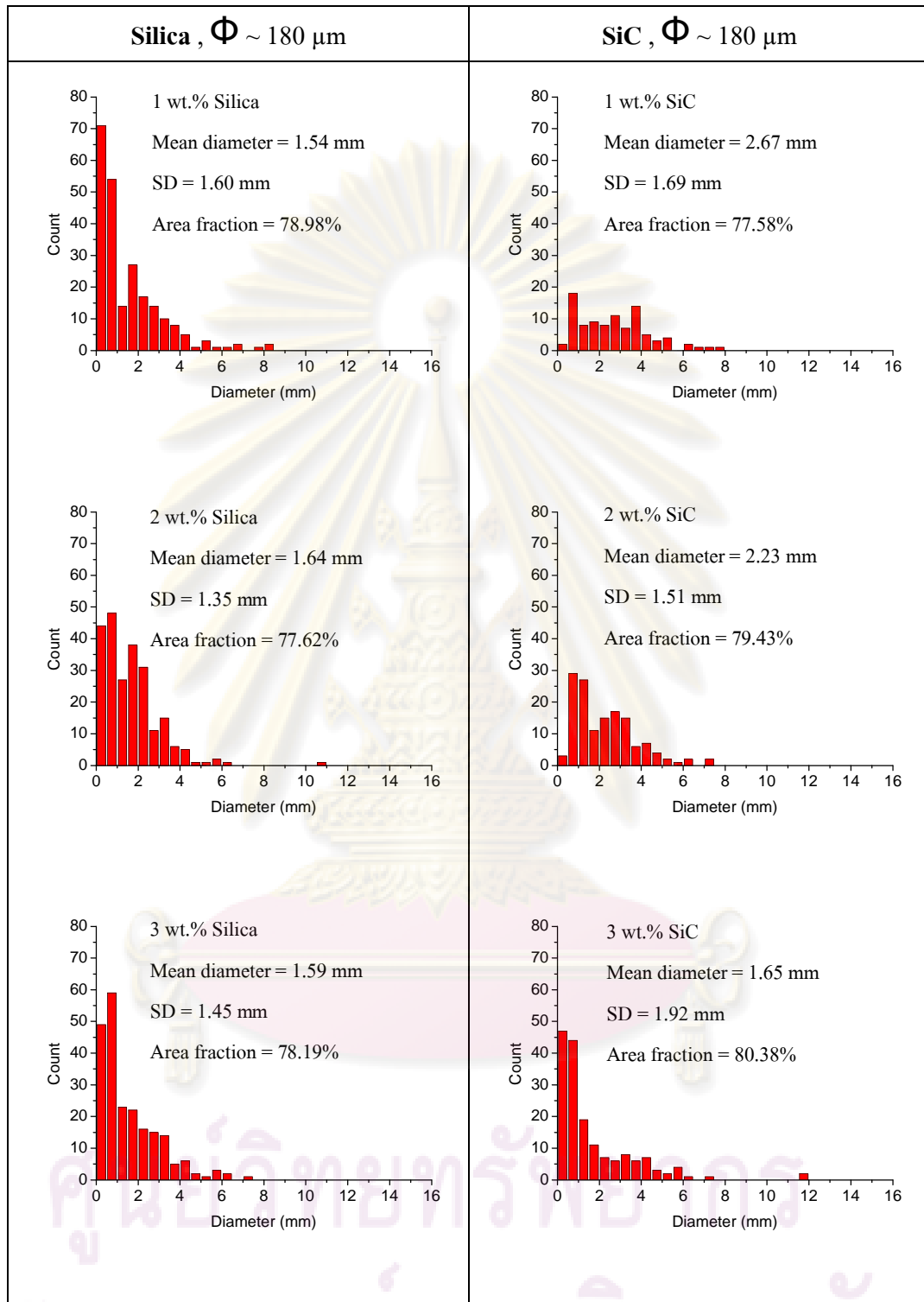
ตารางที่ 1ก (ต่อ) แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโพลิอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมต่างๆ



ตารางที่ 1ก (ต่อ) แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโฟมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมต่างๆ



ตารางที่ 1ก (ต่อ) แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโฟมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมต่างๆ



ตารางที่ 1ก (ต่อ) แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศและสัดส่วนพื้นที่ระหว่างโพรงอากาศกับเนื้อพื้นของโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมต่างๆ



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดของอนุภาค

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน 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

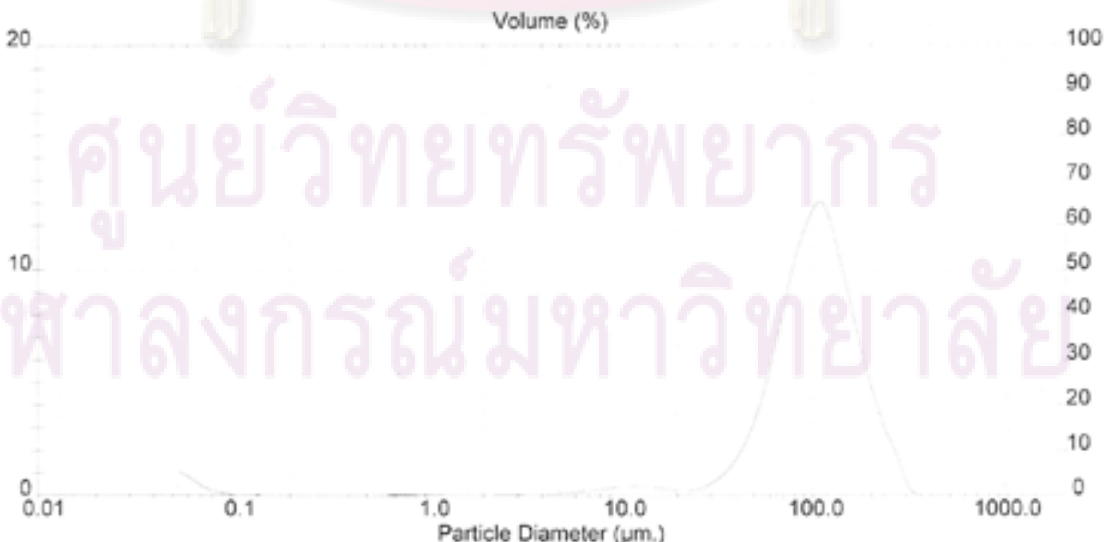
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Sample ID: Aluminium powder | Run Number: 28 | Measured: 3 May 2007 15:30PM |
| Sample File: CHULA4 | Record Number: 28 | Analysed: 3 May 2007 15:30PM |
| Sample Path: C:\SIZER5\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS17 | Obscuration: 10.1 % |
| Presentation: 30UD | [Particle R.I. = (1.5295, 1.0000)] | Dispersant R.I. = 1.3300 | Residual: 0.482 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0081 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 2.4808 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 45.42 um | D [v, 0.5] = 101.54 um | D [v, 0.9] = 184.16 um |
| D [4, 3] = 108.36 um | D [3, 2] = 2.42 um | Span = 1.386E+00 | Uniformity = 4.280E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.04 | 0.06 | 1.03 | 6.63 | 0.23 | 7.72 | 3.64 |
| 0.06 | 0.76 | 0.07 | 1.79 | 7.72 | 0.30 | 9.00 | 3.84 |
| 0.07 | 0.37 | 0.08 | 2.16 | 9.00 | 0.35 | 10.48 | 4.31 |
| 0.08 | 0.17 | 0.09 | 2.33 | 10.48 | 0.41 | 12.21 | 4.71 |
| 0.09 | 0.08 | 0.11 | 2.41 | 12.21 | 0.41 | 14.22 | 5.13 |
| 0.11 | 0.05 | 0.13 | 2.45 | 14.22 | 0.38 | 16.57 | 5.49 |
| 0.13 | 0.03 | 0.15 | 2.49 | 16.57 | 0.28 | 19.31 | 5.77 |
| 0.15 | 0.00 | 0.17 | 2.49 | 19.31 | 0.22 | 22.49 | 5.99 |
| 0.17 | 0.00 | 0.20 | 2.49 | 22.49 | 0.24 | 26.20 | 6.23 |
| 0.20 | 0.00 | 0.23 | 2.49 | 26.20 | 0.42 | 30.53 | 6.65 |
| 0.23 | 0.00 | 0.27 | 2.49 | 30.53 | 0.77 | 35.56 | 7.42 |
| 0.27 | 0.00 | 0.31 | 2.49 | 35.56 | 1.35 | 41.43 | 8.77 |
| 0.31 | 0.00 | 0.38 | 2.49 | 41.43 | 2.27 | 48.27 | 11.04 |
| 0.36 | 0.00 | 0.42 | 2.49 | 48.27 | 3.68 | 56.23 | 14.72 |
| 0.42 | 0.00 | 0.49 | 2.49 | 56.23 | 5.73 | 65.51 | 20.45 |
| 0.49 | 0.00 | 0.55 | 2.49 | 65.51 | 8.25 | 76.32 | 28.71 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 2.51 | 76.32 | 10.67 | 88.91 | 39.38 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 2.53 | 89.91 | 12.29 | 103.58 | 51.67 |
| 0.78 | 0.03 | 0.91 | 2.57 | 103.58 | 12.95 | 120.67 | 64.62 |
| 0.91 | 0.04 | 1.05 | 2.61 | 120.67 | 11.28 | 140.58 | 75.91 |
| 1.08 | 0.05 | 1.24 | 2.65 | 140.58 | 8.91 | 163.77 | 84.81 |
| 1.24 | 0.05 | 1.44 | 2.70 | 163.77 | 6.50 | 190.80 | 91.31 |
| 1.44 | 0.05 | 1.68 | 2.75 | 190.80 | 4.40 | 222.28 | 95.72 |
| 1.68 | 0.05 | 1.95 | 2.80 | 222.28 | 2.71 | 258.95 | 98.43 |
| 1.95 | 0.05 | 2.28 | 2.85 | 258.95 | 1.43 | 301.88 | 99.85 |
| 2.28 | 0.05 | 2.65 | 2.90 | 301.88 | 0.15 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.05 | 3.09 | 2.94 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.05 | 3.60 | 2.99 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.08 | 4.19 | 3.05 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.08 | 4.88 | 3.13 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.12 | 5.69 | 3.25 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.17 | 6.63 | 3.42 | 754.23 | 0.00 | 878.87 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ๑๑๑ ๑๒ ๑ พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 254๑211
 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. 254๑211

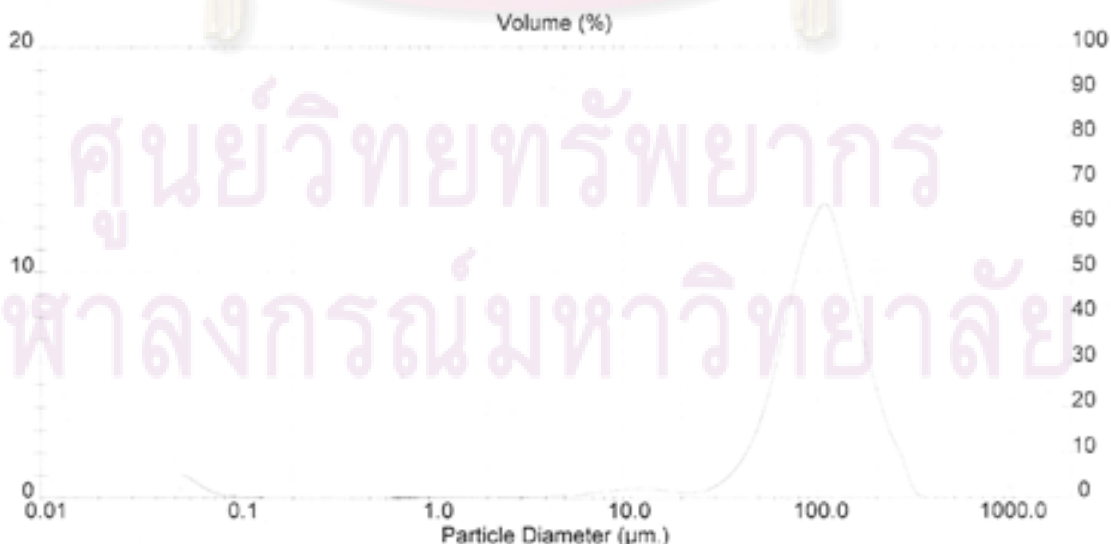
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Sample ID: Aluminium powder | Run Number: 25 | Measured: 3 May 2007 15:30PM |
| Sample File: CHULA4 | Record Number: 28 | Analysed: 3 May 2007 15:30PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS17 | Obscuration: 10.1 % |
| Presentation: 30JD | [Particle R.I. = (1.5295, 1.0000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.482 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0081 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 2.4808 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 45.42 um | D (v, 0.5) = 101.54 um | D (v, 0.9) = 184.16 um |
| D [4, 3] = 108.36 um | D [3, 2] = 2.42 um | Span = 1.368E+00 | Uniformity = 4.260E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.04 | 0.06 | 1.03 | 6.63 | 0.23 | 7.72 | 3.64 |
| 0.06 | 0.76 | 0.07 | 1.79 | 7.72 | 0.30 | 9.00 | 3.94 |
| 0.07 | 0.37 | 0.08 | 2.18 | 9.00 | 0.36 | 10.48 | 4.31 |
| 0.08 | 0.17 | 0.09 | 2.33 | 10.48 | 0.41 | 12.21 | 4.71 |
| 0.09 | 0.08 | 0.11 | 2.41 | 12.21 | 0.41 | 14.22 | 5.13 |
| 0.11 | 0.05 | 0.13 | 2.45 | 14.22 | 0.38 | 16.57 | 5.46 |
| 0.13 | 0.03 | 0.15 | 2.49 | 16.57 | 0.28 | 19.31 | 5.77 |
| 0.15 | 0.00 | 0.17 | 2.49 | 19.31 | 0.22 | 22.49 | 5.99 |
| 0.17 | 0.00 | 0.20 | 2.49 | 22.49 | 0.24 | 26.20 | 6.23 |
| 0.20 | 0.00 | 0.23 | 2.49 | 26.20 | 0.42 | 30.53 | 6.65 |
| 0.23 | 0.00 | 0.27 | 2.49 | 30.53 | 0.77 | 35.56 | 7.42 |
| 0.27 | 0.00 | 0.31 | 2.49 | 35.56 | 1.35 | 41.43 | 8.77 |
| 0.31 | 0.00 | 0.36 | 2.49 | 41.43 | 2.27 | 48.27 | 11.04 |
| 0.36 | 0.00 | 0.42 | 2.49 | 48.27 | 3.88 | 56.23 | 14.72 |
| 0.42 | 0.00 | 0.49 | 2.49 | 56.23 | 5.73 | 65.51 | 20.45 |
| 0.49 | 0.00 | 0.58 | 2.49 | 65.51 | 8.26 | 76.32 | 28.71 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 2.51 | 76.32 | 10.87 | 88.91 | 39.38 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 2.53 | 88.91 | 12.29 | 103.58 | 51.67 |
| 0.78 | 0.03 | 0.91 | 2.57 | 103.58 | 12.95 | 120.67 | 64.62 |
| 0.91 | 0.04 | 1.00 | 2.61 | 120.67 | 11.28 | 140.58 | 75.91 |
| 1.00 | 0.05 | 1.24 | 2.65 | 140.58 | 8.91 | 163.77 | 84.81 |
| 1.24 | 0.05 | 1.44 | 2.70 | 163.77 | 6.50 | 190.80 | 91.31 |
| 1.44 | 0.05 | 1.68 | 2.75 | 190.80 | 4.40 | 222.28 | 95.72 |
| 1.68 | 0.05 | 1.95 | 2.80 | 222.28 | 2.71 | 258.95 | 98.43 |
| 1.95 | 0.05 | 2.28 | 2.85 | 258.95 | 1.43 | 301.68 | 99.85 |
| 2.28 | 0.05 | 2.65 | 2.90 | 301.68 | 0.15 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.05 | 3.09 | 2.94 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.05 | 3.60 | 2.99 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.06 | 4.19 | 3.05 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.08 | 4.88 | 3.13 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.12 | 5.69 | 3.25 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.17 | 6.63 | 3.42 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Sample ID: Aluminium powder | Run Number: 34 | Measured: 3 May 2007 15:31PM |
| Sample File: CHULA4 | Record Number: 33 | Analysed: 3 May 2007 15:31PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS17 | Obscuration: 10.3 % |
| Presentation: 30JD | [Particle R.I. = (1.5295, 1.0000); | Dispersion R.I. = 1.3300] | Residual: 0.474 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0095 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 2.0690 sq. m / g |
| Mean Diameter: | D [v, 0.1] = 45.34 um | D [v, 0.5] = 101.64 um | D [v, 0.9] = 193.83 um |
| D [4, 3] = 108.61 um | D [3, 2] = 2.90 um | Span = 1.353E+00 | Uniformity = 4.241E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.87 | 0.06 | 0.87 | 6.63 | 0.23 | 7.72 | 3.32 |
| 0.06 | 0.60 | 0.07 | 1.47 | 7.72 | 0.30 | 9.00 | 3.61 |
| 0.07 | 0.28 | 0.08 | 1.76 | 9.00 | 0.36 | 10.48 | 3.97 |
| 0.08 | 0.12 | 0.09 | 1.88 | 10.48 | 0.41 | 12.21 | 4.38 |
| 0.09 | 0.06 | 0.11 | 1.93 | 12.21 | 0.42 | 14.22 | 4.80 |
| 0.11 | 0.03 | 0.13 | 1.96 | 14.22 | 0.38 | 16.57 | 5.18 |
| 0.13 | 0.02 | 0.15 | 1.98 | 16.57 | 0.29 | 19.31 | 5.47 |
| 0.15 | 0.02 | 0.17 | 2.01 | 19.31 | 0.23 | 22.49 | 5.70 |
| 0.17 | 0.03 | 0.20 | 2.03 | 22.49 | 0.25 | 26.20 | 5.95 |
| 0.20 | 0.04 | 0.23 | 2.07 | 26.20 | 0.42 | 30.53 | 6.37 |
| 0.23 | 0.04 | 0.27 | 2.11 | 30.53 | 0.76 | 35.56 | 7.13 |
| 0.27 | 0.03 | 0.31 | 2.13 | 35.56 | 1.33 | 41.43 | 8.46 |
| 0.31 | 0.02 | 0.36 | 2.15 | 41.43 | 2.24 | 48.27 | 10.71 |
| 0.36 | 0.02 | 0.42 | 2.17 | 48.27 | 3.64 | 56.23 | 14.35 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 2.19 | 56.23 | 5.71 | 65.51 | 20.06 |
| 0.49 | 0.01 | 0.58 | 2.20 | 65.51 | 8.30 | 76.32 | 28.36 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 2.22 | 76.32 | 10.79 | 88.91 | 39.15 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 2.24 | 88.91 | 12.46 | 103.58 | 51.61 |
| 0.78 | 0.03 | 0.91 | 2.27 | 103.58 | 13.12 | 120.67 | 64.73 |
| 0.91 | 0.04 | 1.06 | 2.30 | 120.67 | 11.35 | 140.58 | 76.08 |
| 1.06 | 0.04 | 1.24 | 2.34 | 140.58 | 8.86 | 163.77 | 84.95 |
| 1.24 | 0.04 | 1.44 | 2.39 | 163.77 | 6.42 | 190.80 | 91.38 |
| 1.44 | 0.05 | 1.68 | 2.43 | 190.80 | 4.33 | 222.28 | 95.70 |
| 1.68 | 0.05 | 1.95 | 2.48 | 222.28 | 2.68 | 258.95 | 98.38 |
| 1.95 | 0.05 | 2.28 | 2.53 | 258.95 | 1.43 | 301.68 | 99.81 |
| 2.28 | 0.05 | 2.65 | 2.58 | 301.68 | 0.19 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.05 | 3.09 | 2.62 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.05 | 3.60 | 2.67 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.06 | 4.19 | 2.73 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.08 | 4.88 | 2.81 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.11 | 5.69 | 2.92 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.16 | 6.63 | 3.09 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |



ศูนย์วิทยาศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 21881101 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, 21881101 Fax. 2540211

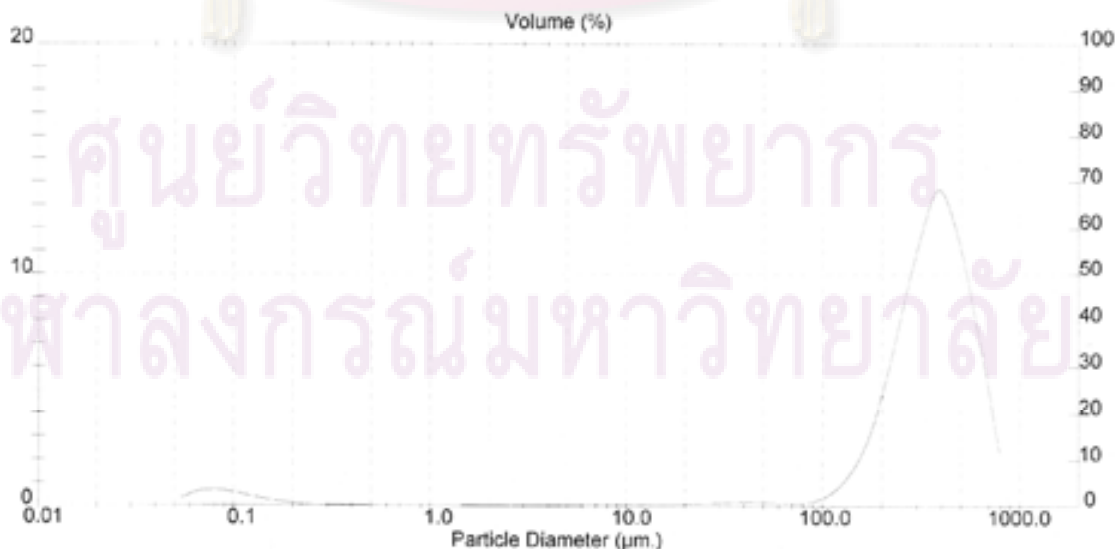
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (ICI) No 00 | Run Number: 1 | Measured: 26 Sep 2006 15:42PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 559 | Analysed: 26 Sep 2006 15:42PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| 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: 1.285 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0582 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 2.9092 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 160.39 um | D (v, 0.5) = 358.71 um | D (v, 0.9) = 605.16 um |
| D [4, 3] = 267.77 um | D [3, 2] = 2.06 um | Span = 1.240E+00 | Uniformity = 3.612E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.33 | 0.06 | 0.33 | 6.63 | 0.05 | 7.72 | 4.79 |
| 0.06 | 0.56 | 0.07 | 0.89 | 7.72 | 0.06 | 9.00 | 4.85 |
| 0.07 | 0.67 | 0.08 | 1.56 | 9.00 | 0.06 | 10.48 | 4.50 |
| 0.08 | 0.67 | 0.09 | 2.23 | 10.48 | 0.05 | 12.21 | 4.56 |
| 0.09 | 0.58 | 0.11 | 2.81 | 12.21 | 0.05 | 14.22 | 5.01 |
| 0.11 | 0.46 | 0.13 | 3.27 | 14.22 | 0.05 | 16.57 | 5.06 |
| 0.13 | 0.34 | 0.15 | 3.61 | 16.57 | 0.06 | 19.31 | 5.12 |
| 0.15 | 0.24 | 0.17 | 3.85 | 19.31 | 0.08 | 22.49 | 5.19 |
| 0.17 | 0.16 | 0.20 | 4.01 | 22.49 | 0.11 | 26.20 | 5.30 |
| 0.20 | 0.10 | 0.23 | 4.11 | 26.20 | 0.14 | 30.53 | 5.44 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 4.18 | 30.53 | 0.17 | 35.56 | 5.61 |
| 0.27 | 0.05 | 0.31 | 4.22 | 35.56 | 0.19 | 41.43 | 5.70 |
| 0.31 | 0.04 | 0.38 | 4.26 | 41.43 | 0.19 | 48.27 | 5.98 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 4.29 | 48.27 | 0.16 | 56.23 | 6.14 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 4.32 | 56.23 | 0.12 | 65.51 | 6.26 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 4.33 | 65.51 | 0.09 | 76.32 | 6.36 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 4.35 | 76.32 | 0.12 | 88.91 | 6.48 |
| 0.67 | 0.01 | 0.78 | 4.36 | 88.91 | 0.20 | 103.58 | 6.74 |
| 0.78 | 0.01 | 0.91 | 4.38 | 103.58 | 0.20 | 120.67 | 7.30 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 4.40 | 120.67 | 1.09 | 140.58 | 8.36 |
| 1.06 | 0.02 | 1.24 | 4.42 | 140.58 | 1.84 | 163.77 | 10.33 |
| 1.24 | 0.02 | 1.44 | 4.44 | 163.77 | 3.24 | 190.80 | 13.57 |
| 1.44 | 0.02 | 1.68 | 4.46 | 190.80 | 5.11 | 222.28 | 18.68 |
| 1.68 | 0.02 | 1.95 | 4.49 | 222.28 | 7.49 | 268.06 | 26.17 |
| 1.95 | 0.02 | 2.28 | 4.51 | 268.06 | 9.98 | 301.68 | 36.14 |
| 2.28 | 0.02 | 2.65 | 4.53 | 301.68 | 12.08 | 351.46 | 48.22 |
| 2.65 | 0.02 | 3.09 | 4.56 | 351.46 | 13.62 | 409.45 | 61.65 |
| 3.09 | 0.03 | 3.60 | 4.58 | 409.45 | 12.75 | 477.01 | 74.59 |
| 3.60 | 0.03 | 4.19 | 4.61 | 477.01 | 10.68 | 555.71 | 85.27 |
| 4.19 | 0.03 | 4.88 | 4.65 | 555.71 | 7.85 | 647.41 | 93.12 |
| 4.88 | 0.04 | 5.69 | 4.69 | 647.41 | 4.91 | 754.23 | 98.03 |
| 5.69 | 0.05 | 6.63 | 4.74 | 754.23 | 1.97 | 878.07 | 100.00 |





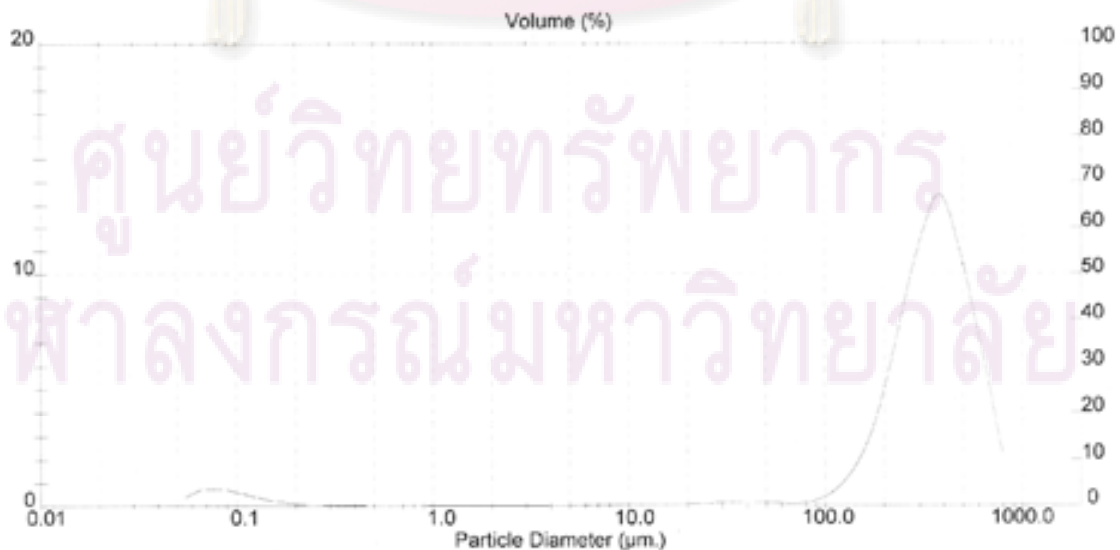
Analysis Result

| Sample Details | | |
|---|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) No.50 | Run Number: 4 | Measured: 26 Sep 2006 15:42PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 562 | Analysed: 26 Sep 2006 15:42PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System Dispersing Medium : Water Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 13.7 % |
| Presentation: 3CHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 1.135 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0535 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 3.1891 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 150.68 um | D [v, 0.5] = 348.80 um | D [v, 0.9] = 598.41 um |
| D [4, 3] = 359.20 um | D [3, 2] = 1.88 um | Span = 1.283E+00 | Uniformity = 4.032E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.38 | 0.06 | 0.38 | 6.63 | 0.07 | 7.72 | 5.20 |
| 0.06 | 0.65 | 0.07 | 1.03 | 7.72 | 0.08 | 9.00 | 5.28 |
| 0.07 | 0.76 | 0.08 | 1.79 | 9.00 | 0.08 | 10.48 | 5.37 |
| 0.08 | 0.74 | 0.09 | 2.53 | 10.48 | 0.08 | 12.21 | 5.45 |
| 0.09 | 0.62 | 0.11 | 3.15 | 12.21 | 0.08 | 14.22 | 5.52 |
| 0.11 | 0.47 | 0.13 | 3.82 | 14.22 | 0.07 | 16.57 | 5.59 |
| 0.13 | 0.34 | 0.15 | 3.96 | 16.57 | 0.07 | 19.31 | 5.66 |
| 0.15 | 0.23 | 0.17 | 4.18 | 19.31 | 0.08 | 22.49 | 5.75 |
| 0.17 | 0.15 | 0.20 | 4.33 | 22.49 | 0.10 | 26.20 | 5.85 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 4.42 | 26.20 | 0.13 | 30.53 | 5.97 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 4.48 | 30.53 | 0.15 | 35.58 | 6.12 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 4.52 | 35.58 | 0.16 | 41.43 | 6.28 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 4.55 | 41.43 | 0.16 | 48.27 | 6.45 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 4.58 | 48.27 | 0.14 | 56.23 | 6.59 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 4.60 | 56.23 | 0.11 | 65.51 | 6.70 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 4.62 | 65.51 | 0.10 | 76.32 | 6.80 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 4.64 | 76.32 | 0.15 | 88.91 | 6.85 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 4.65 | 88.91 | 0.32 | 103.58 | 7.27 |
| 0.78 | 0.02 | 0.91 | 4.67 | 103.58 | 0.66 | 120.67 | 7.53 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 4.70 | 120.67 | 1.24 | 140.58 | 9.17 |
| 1.06 | 0.03 | 1.24 | 4.73 | 140.58 | 2.12 | 163.77 | 11.29 |
| 1.24 | 0.03 | 1.44 | 4.76 | 163.77 | 3.47 | 190.80 | 14.76 |
| 1.44 | 0.03 | 1.68 | 4.79 | 190.80 | 5.42 | 222.28 | 20.19 |
| 1.68 | 0.03 | 1.95 | 4.82 | 222.28 | 7.87 | 258.95 | 28.06 |
| 1.95 | 0.03 | 2.28 | 4.85 | 258.95 | 10.33 | 301.68 | 38.39 |
| 2.28 | 0.03 | 2.65 | 4.88 | 301.68 | 12.23 | 351.46 | 50.82 |
| 2.65 | 0.03 | 3.09 | 4.91 | 351.46 | 13.40 | 409.45 | 64.02 |
| 3.09 | 0.03 | 3.60 | 4.94 | 409.45 | 12.14 | 477.01 | 78.16 |
| 3.60 | 0.03 | 4.19 | 4.98 | 477.01 | 9.97 | 555.71 | 86.13 |
| 4.19 | 0.04 | 4.88 | 5.02 | 555.71 | 7.30 | 647.41 | 93.43 |
| 4.88 | 0.05 | 5.69 | 5.07 | 647.41 | 4.62 | 754.23 | 98.05 |
| 5.69 | 0.06 | 6.63 | 5.13 | 754.23 | 1.95 | 878.67 | 100.00 |





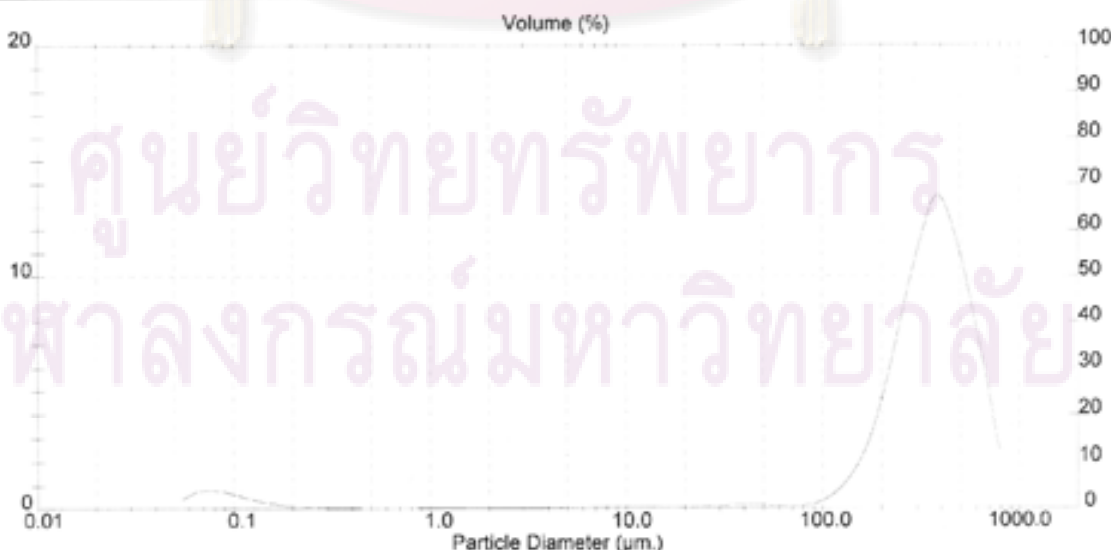
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) No.60 | Run Number: 8 | Measured: 26 Sep 2006 15:43PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 565 | Analysed: 26 Sep 2006 15:43PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 14.1 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000)] | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 1.042 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0539 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 3.3064 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 152.20 um | D [v, 0.5] = 357.40 um | D [v, 0.9] = 607.78 um |
| D [4, 3] = 368.05 um | D [3, 2] = 1.81 um | Span = 1.275E+00 | Uniformity = 3.997E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.41 | 0.06 | 0.41 | 6.63 | 0.08 | 7.72 | 5.36 |
| 0.06 | 0.69 | 0.07 | 1.10 | 7.72 | 0.09 | 9.00 | 5.46 |
| 0.07 | 0.80 | 0.08 | 1.89 | 9.00 | 0.10 | 10.48 | 5.55 |
| 0.08 | 0.76 | 0.09 | 2.66 | 10.48 | 0.10 | 12.21 | 5.66 |
| 0.09 | 0.63 | 0.11 | 3.29 | 12.21 | 0.10 | 14.22 | 5.75 |
| 0.11 | 0.47 | 0.13 | 3.76 | 14.22 | 0.09 | 16.57 | 5.85 |
| 0.13 | 0.33 | 0.15 | 4.09 | 16.57 | 0.09 | 19.31 | 5.93 |
| 0.15 | 0.22 | 0.17 | 4.31 | 19.31 | 0.09 | 22.49 | 6.02 |
| 0.17 | 0.14 | 0.20 | 4.45 | 22.49 | 0.10 | 26.20 | 6.13 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 4.54 | 26.20 | 0.12 | 30.53 | 6.25 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 4.60 | 30.53 | 0.14 | 35.56 | 6.39 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 4.64 | 35.56 | 0.15 | 41.43 | 6.54 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 4.07 | 41.43 | 0.16 | 48.27 | 6.70 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 4.70 | 48.27 | 0.14 | 56.23 | 6.84 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 4.72 | 56.23 | 0.11 | 65.51 | 6.94 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 4.74 | 65.51 | 0.09 | 76.32 | 7.03 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 4.76 | 76.32 | 0.13 | 88.91 | 7.16 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 4.77 | 88.91 | 0.28 | 103.58 | 7.44 |
| 0.78 | 0.02 | 0.91 | 4.80 | 103.58 | 0.58 | 120.67 | 8.03 |
| 0.91 | 0.03 | 1.06 | 4.82 | 120.67 | 1.10 | 140.58 | 9.13 |
| 1.06 | 0.03 | 1.24 | 4.86 | 140.58 | 1.91 | 163.77 | 11.04 |
| 1.24 | 0.03 | 1.44 | 4.89 | 163.77 | 3.17 | 190.80 | 14.21 |
| 1.44 | 0.04 | 1.68 | 4.93 | 190.80 | 5.01 | 222.28 | 19.23 |
| 1.68 | 0.04 | 1.95 | 4.96 | 222.28 | 7.40 | 258.95 | 26.63 |
| 1.95 | 0.03 | 2.28 | 4.99 | 258.95 | 9.92 | 301.68 | 36.54 |
| 2.28 | 0.03 | 2.65 | 5.03 | 301.68 | 12.01 | 351.46 | 48.55 |
| 2.65 | 0.03 | 3.09 | 5.06 | 351.46 | 13.46 | 409.45 | 62.02 |
| 3.09 | 0.03 | 3.60 | 5.09 | 409.45 | 12.53 | 477.01 | 74.55 |
| 3.60 | 0.04 | 4.19 | 5.13 | 477.01 | 10.54 | 555.71 | 85.08 |
| 4.19 | 0.04 | 4.88 | 5.17 | 555.71 | 7.93 | 647.41 | 92.91 |
| 4.88 | 0.05 | 5.69 | 5.22 | 647.41 | 4.97 | 754.23 | 97.88 |
| 5.69 | 0.07 | 6.63 | 5.29 | 754.23 | 2.12 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท กรุงเทพมหานคร 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

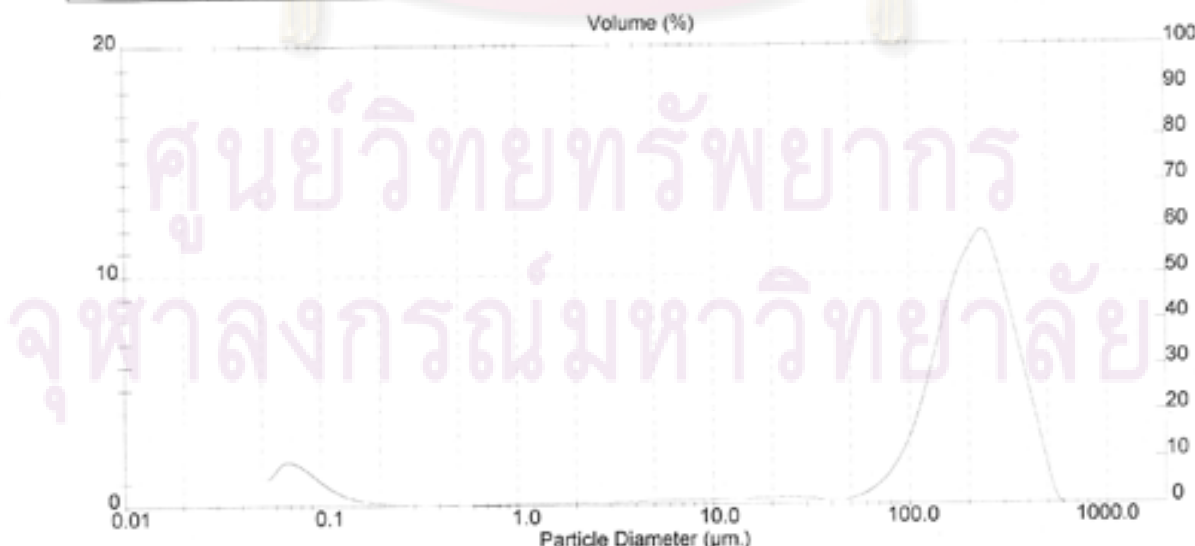
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HG) No.120 | Run Number: 3 | Measured: 26 Sep 2006 15:23PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 530 | Analysed: 26 Sep 2006 15:23PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 |
| Presentation: 3CHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1030); | Dispersant R.I. = 1.3300] |
| Analysis Model: Polydisperse | | Obscuration: 15.1 % |
| Modifiers: None | | Residual: 0.434 % |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0303 %Vol | Density = 1.000 g/cub.cm | Specific S.A. = 7.0261 sq.m/g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 3.57 um | D [v, 0.5] = 197.18 um | D [v, 0.9] = 355.92 um |
| D [4, 3] = 199.57 um | D [3, 2] = 0.85 um | Span = 1.787E+00 | Uniformity = 4.779E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.17 | 0.08 | 1.17 | 6.63 | 0.20 | 7.72 | 10.93 |
| 0.06 | 1.77 | 0.07 | 2.94 | 7.72 | 0.20 | 9.00 | 11.13 |
| 0.07 | 1.83 | 0.08 | 4.77 | 9.00 | 0.20 | 10.48 | 11.33 |
| 0.08 | 1.51 | 0.09 | 6.28 | 10.48 | 0.21 | 12.21 | 11.53 |
| 0.09 | 1.07 | 0.11 | 7.35 | 12.21 | 0.22 | 14.22 | 11.75 |
| 0.11 | 0.88 | 0.13 | 8.04 | 14.22 | 0.24 | 16.57 | 12.00 |
| 0.13 | 0.41 | 0.15 | 8.45 | 16.57 | 0.27 | 19.31 | 12.27 |
| 0.15 | 0.25 | 0.17 | 8.70 | 19.31 | 0.29 | 22.49 | 12.56 |
| 0.17 | 0.15 | 0.20 | 8.85 | 22.49 | 0.30 | 26.20 | 12.85 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 8.95 | 26.20 | 0.27 | 30.53 | 13.13 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 9.01 | 30.53 | 0.23 | 35.56 | 13.36 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 9.05 | 35.56 | 0.18 | 41.43 | 13.53 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 9.08 | 41.43 | 0.17 | 48.27 | 13.70 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 9.11 | 48.27 | 0.26 | 56.23 | 13.95 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 9.13 | 56.23 | 0.49 | 65.51 | 14.44 |
| 0.49 | 0.02 | 0.55 | 9.16 | 65.51 | 0.87 | 76.32 | 15.32 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 9.18 | 76.32 | 1.49 | 88.91 | 16.81 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 9.21 | 88.91 | 2.47 | 103.58 | 19.28 |
| 0.78 | 0.04 | 0.91 | 9.24 | 103.58 | 3.99 | 120.67 | 23.24 |
| 0.91 | 0.05 | 1.05 | 9.29 | 120.67 | 6.02 | 140.59 | 26.26 |
| 1.05 | 0.06 | 1.24 | 9.35 | 140.59 | 8.26 | 163.77 | 37.52 |
| 1.24 | 0.07 | 1.44 | 9.42 | 163.77 | 10.14 | 190.80 | 47.65 |
| 1.44 | 0.07 | 1.68 | 9.40 | 190.80 | 11.27 | 222.28 | 58.92 |
| 1.68 | 0.08 | 1.95 | 9.57 | 222.28 | 11.82 | 258.95 | 70.75 |
| 1.95 | 0.09 | 2.28 | 9.66 | 258.95 | 10.41 | 301.68 | 81.16 |
| 2.28 | 0.10 | 2.65 | 9.76 | 301.68 | 8.28 | 351.46 | 89.43 |
| 2.65 | 0.11 | 3.00 | 9.87 | 351.46 | 5.85 | 409.45 | 95.28 |
| 3.00 | 0.13 | 3.80 | 10.01 | 409.45 | 3.52 | 477.01 | 98.80 |
| 3.80 | 0.15 | 4.19 | 10.16 | 477.01 | 1.20 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.17 | 4.88 | 10.33 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.19 | 5.69 | 10.53 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.20 | 6.63 | 10.73 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





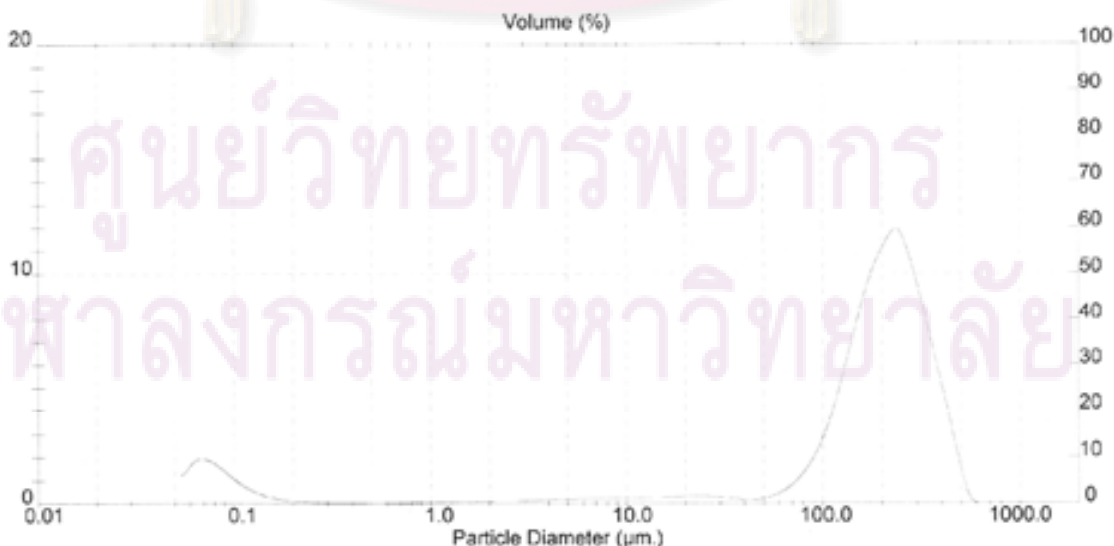
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) No.120 | Run Number: 5 | Measured: 26 Sep 2006 15:24PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 532 | Analysed: 26 Sep 2006 15:24PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000)] | Dispersant R.I. = 1.3300 |
| Analysis Model: Polydisperse | | Obscuration: 15.0 % |
| Modifications: None | | Residual: 0.475 % |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0294 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 7.1755 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 2.45 um | D (v, 0.5) = 197.37 um | D (v, 0.9) = 355.63 um |
| D [4, 3] = 199.14 um | D [3, 2] = 0.84 um | Span = 1.787E+00 | Uniformity = 4.791E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.20 | 0.06 | 1.20 | 6.63 | 0.21 | 7.72 | 11.14 |
| 0.06 | 1.82 | 0.07 | 3.01 | 7.72 | 0.21 | 9.00 | 11.36 |
| 0.07 | 1.87 | 0.08 | 4.89 | 9.00 | 0.22 | 10.48 | 11.57 |
| 0.08 | 1.55 | 0.09 | 6.44 | 10.48 | 0.22 | 12.21 | 11.80 |
| 0.09 | 1.09 | 0.11 | 7.53 | 12.21 | 0.24 | 14.22 | 12.04 |
| 0.11 | 0.69 | 0.13 | 8.22 | 14.22 | 0.27 | 16.57 | 12.30 |
| 0.13 | 0.42 | 0.15 | 8.63 | 16.57 | 0.29 | 19.31 | 12.60 |
| 0.15 | 0.25 | 0.17 | 8.88 | 19.31 | 0.31 | 22.49 | 12.91 |
| 0.17 | 0.15 | 0.20 | 9.03 | 22.49 | 0.31 | 26.20 | 13.22 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 9.12 | 26.20 | 0.28 | 30.53 | 13.51 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 9.18 | 30.53 | 0.23 | 35.56 | 13.74 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 9.22 | 35.56 | 0.18 | 41.43 | 13.91 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 9.25 | 41.43 | 0.16 | 48.27 | 14.07 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 9.27 | 48.27 | 0.24 | 56.23 | 14.31 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 9.30 | 56.23 | 0.45 | 65.51 | 14.77 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 9.32 | 65.51 | 0.84 | 76.32 | 15.61 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 9.34 | 76.32 | 1.46 | 88.91 | 17.07 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 9.37 | 88.91 | 2.43 | 103.58 | 19.50 |
| 0.78 | 0.04 | 0.91 | 9.41 | 103.58 | 3.91 | 120.67 | 23.42 |
| 0.91 | 0.05 | 1.06 | 9.46 | 120.67 | 5.94 | 140.58 | 29.36 |
| 1.06 | 0.06 | 1.24 | 9.52 | 140.58 | 8.16 | 163.77 | 37.52 |
| 1.24 | 0.07 | 1.44 | 9.59 | 163.77 | 10.07 | 190.80 | 47.59 |
| 1.44 | 0.07 | 1.68 | 9.67 | 190.80 | 11.28 | 222.28 | 58.85 |
| 1.68 | 0.09 | 1.95 | 9.75 | 222.28 | 11.88 | 258.95 | 70.70 |
| 1.95 | 0.09 | 2.28 | 9.84 | 258.95 | 10.44 | 301.68 | 81.15 |
| 2.28 | 0.10 | 2.65 | 9.95 | 301.68 | 8.32 | 351.46 | 89.47 |
| 2.65 | 0.12 | 3.08 | 10.06 | 351.46 | 5.88 | 409.45 | 95.35 |
| 3.08 | 0.14 | 3.60 | 10.20 | 409.45 | 3.51 | 477.01 | 98.86 |
| 3.60 | 0.16 | 4.19 | 10.36 | 477.01 | 1.14 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.18 | 4.88 | 10.53 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.19 | 5.69 | 10.73 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.21 | 6.63 | 10.93 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาปน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2140211
 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

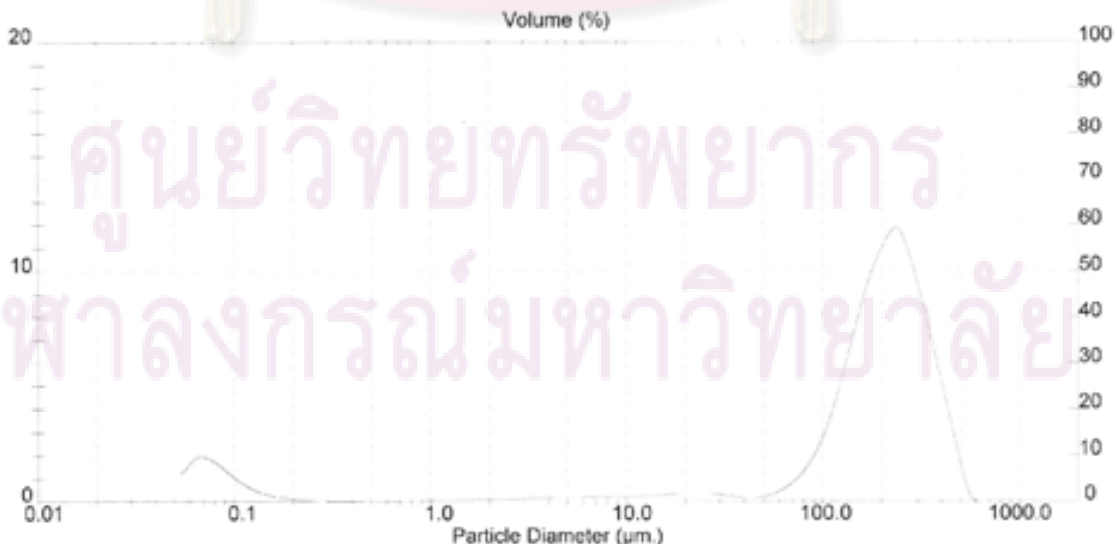
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) No.120 | Run Number: 7 | Measured: 26 Sep 2008 15:24PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 504 | Analysed: 26 Sep 2008 15:24PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 15.2 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.453 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0298 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 7.2262 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 2.67 um | D [v, 0.5] = 188.31 um | D [v, 0.9] = 358.01 um |
| D [4, 3] = 200.04 um | D [3, 2] = 6.83 um | Span = 1.792E+00 | Uniformity = 4.811E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Uncer% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.22 | 0.06 | 1.22 | 6.63 | 0.21 | 7.72 | 11.17 |
| 0.06 | 1.84 | 0.07 | 3.06 | 7.72 | 0.21 | 9.00 | 11.38 |
| 0.07 | 1.89 | 0.08 | 4.95 | 9.00 | 0.22 | 10.48 | 11.60 |
| 0.08 | 1.55 | 0.09 | 6.50 | 10.48 | 0.23 | 12.21 | 11.83 |
| 0.09 | 1.09 | 0.11 | 7.59 | 12.21 | 0.25 | 14.22 | 12.08 |
| 0.11 | 0.69 | 0.13 | 8.27 | 14.22 | 0.28 | 16.57 | 12.36 |
| 0.13 | 0.41 | 0.15 | 8.89 | 16.57 | 0.31 | 19.31 | 12.87 |
| 0.15 | 0.24 | 0.17 | 8.93 | 19.31 | 0.33 | 22.40 | 13.00 |
| 0.17 | 0.15 | 0.20 | 9.07 | 22.49 | 0.33 | 26.20 | 13.34 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 9.16 | 26.20 | 0.30 | 30.53 | 13.84 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 9.22 | 30.53 | 0.25 | 35.56 | 13.80 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 9.26 | 35.56 | 0.19 | 41.43 | 14.08 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 9.28 | 41.43 | 0.17 | 48.27 | 14.24 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 9.31 | 48.27 | 0.24 | 56.23 | 14.48 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 9.33 | 56.23 | 0.45 | 65.51 | 14.90 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 9.36 | 65.51 | 0.83 | 76.32 | 15.76 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 9.38 | 76.32 | 1.43 | 88.91 | 17.19 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 9.41 | 88.91 | 2.39 | 103.88 | 19.58 |
| 0.78 | 0.04 | 0.91 | 9.45 | 103.88 | 3.85 | 120.67 | 23.42 |
| 0.91 | 0.05 | 1.06 | 9.50 | 120.67 | 5.85 | 140.58 | 29.28 |
| 1.06 | 0.06 | 1.24 | 9.57 | 140.58 | 8.05 | 163.77 | 37.33 |
| 1.24 | 0.07 | 1.44 | 9.64 | 163.77 | 9.95 | 190.80 | 47.28 |
| 1.44 | 0.08 | 1.68 | 9.71 | 190.80 | 11.17 | 222.28 | 55.45 |
| 1.68 | 0.09 | 1.95 | 9.80 | 222.28 | 11.82 | 258.95 | 70.26 |
| 1.95 | 0.09 | 2.28 | 9.89 | 258.95 | 10.48 | 301.68 | 80.75 |
| 2.28 | 0.10 | 2.66 | 10.00 | 301.68 | 8.41 | 351.46 | 89.15 |
| 2.66 | 0.12 | 3.09 | 10.11 | 351.46 | 5.99 | 409.45 | 95.14 |
| 3.09 | 0.13 | 3.60 | 10.25 | 409.45 | 3.82 | 477.01 | 97.75 |
| 3.60 | 0.15 | 4.19 | 10.40 | 477.01 | 1.25 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.17 | 4.88 | 10.57 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.19 | 5.69 | 10.76 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.20 | 6.63 | 10.96 | 754.23 | 0.00 | 878.87 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ๕๕๕ ๕2 อ.ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2140211
 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

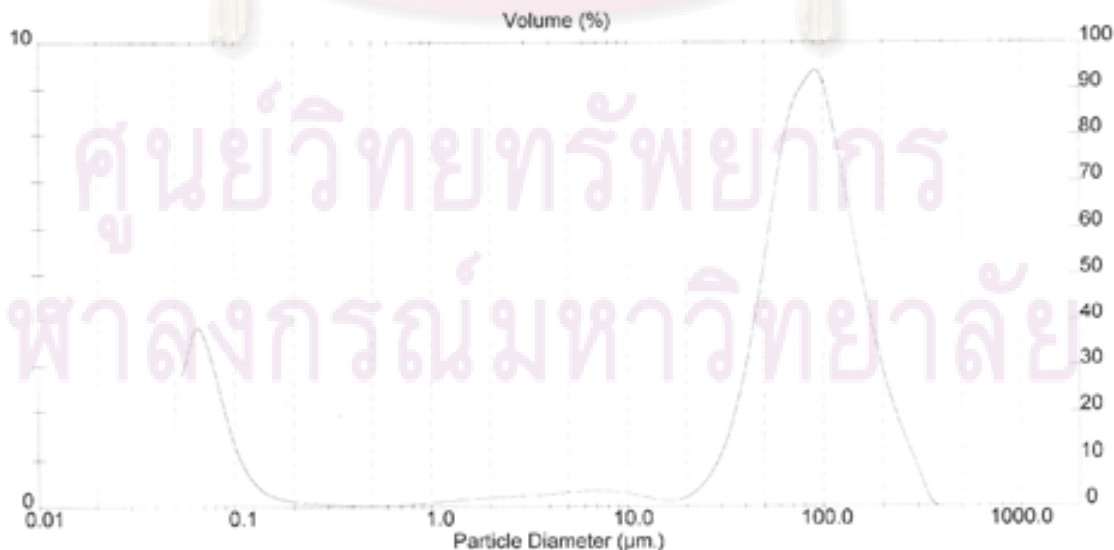
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HCI) No.400 | Run Number: 3 | Measured: 26 Sep 2006 12:39PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 509 | Analysed: 26 Sep 2006 12:39PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 16.1 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000)] | Dispersant R.I. = 1.3300 | Residual: 0.445 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0191 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 12.8591 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.68 um | D [v, 0.5] = 74.47 um | D [v, 0.9] = 163.26 um |
| D [4, 3] = 81.19 um | D [3, 2] = 0.47 um | Span = 2.191E+00 | Uniformity = 6.467E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 2.77 | 0.06 | 2.77 | 6.63 | 0.34 | 7.72 | 18.66 |
| 0.06 | 3.76 | 0.07 | 6.56 | 7.72 | 0.33 | 9.00 | 18.99 |
| 0.07 | 3.36 | 0.08 | 9.95 | 9.00 | 0.30 | 10.48 | 19.29 |
| 0.08 | 2.36 | 0.09 | 12.32 | 10.48 | 0.24 | 12.21 | 19.53 |
| 0.09 | 1.38 | 0.11 | 13.70 | 12.21 | 0.17 | 14.22 | 19.70 |
| 0.11 | 0.73 | 0.13 | 14.43 | 14.22 | 0.12 | 16.57 | 19.83 |
| 0.13 | 0.39 | 0.15 | 14.82 | 16.57 | 0.13 | 19.31 | 19.96 |
| 0.15 | 0.22 | 0.17 | 15.04 | 19.31 | 0.23 | 22.49 | 20.19 |
| 0.17 | 0.14 | 0.20 | 15.18 | 22.49 | 0.46 | 26.20 | 20.65 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 15.27 | 26.20 | 0.87 | 30.53 | 21.52 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 15.34 | 30.53 | 1.52 | 35.56 | 23.04 |
| 0.27 | 0.05 | 0.31 | 15.39 | 35.56 | 2.54 | 41.43 | 25.58 |
| 0.31 | 0.04 | 0.36 | 15.43 | 41.43 | 3.99 | 48.27 | 29.58 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 15.46 | 48.27 | 5.75 | 56.23 | 35.32 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 15.49 | 56.23 | 7.47 | 65.51 | 42.79 |
| 0.49 | 0.03 | 0.58 | 15.51 | 65.51 | 8.64 | 76.32 | 51.43 |
| 0.58 | 0.03 | 0.67 | 15.54 | 76.32 | 9.16 | 88.91 | 60.59 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 15.58 | 88.91 | 9.30 | 103.58 | 69.90 |
| 0.78 | 0.05 | 0.91 | 15.63 | 103.58 | 8.21 | 120.67 | 78.11 |
| 0.91 | 0.08 | 1.06 | 15.71 | 120.67 | 6.77 | 140.58 | 84.87 |
| 1.06 | 0.11 | 1.24 | 15.82 | 140.58 | 5.22 | 163.77 | 90.09 |
| 1.24 | 0.13 | 1.44 | 15.95 | 163.77 | 3.84 | 190.80 | 93.94 |
| 1.44 | 0.15 | 1.68 | 16.10 | 190.80 | 2.71 | 222.28 | 96.64 |
| 1.68 | 0.19 | 1.95 | 16.28 | 222.28 | 1.82 | 258.95 | 98.46 |
| 1.95 | 0.19 | 2.28 | 16.47 | 258.95 | 1.12 | 301.68 | 99.58 |
| 2.28 | 0.21 | 2.65 | 16.68 | 301.68 | 0.42 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.22 | 3.09 | 16.90 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.24 | 3.60 | 17.13 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.26 | 4.19 | 17.39 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.28 | 4.88 | 17.68 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.31 | 5.69 | 17.99 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.33 | 6.63 | 18.32 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





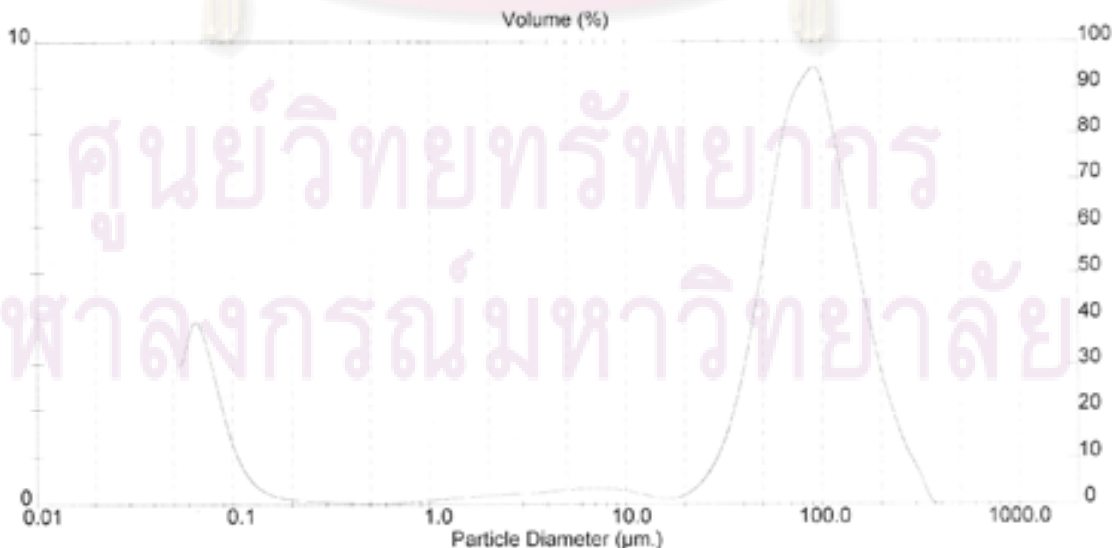
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) No.400 | Run Number: 5 | Measured: 26 Sep 2006 12:39PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 511 | Analysed: 26 Sep 2006 12:39PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: M51 | Obscuration: 15.4 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.395 % |
| Analysis Mode: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0181 %/Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 13.0263 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.98 um | D [v, 0.5] = 74.38 um | D [v, 0.9] = 182.19 um |
| D [4, 3] = 80.51 um | D [S, 2] = 6.46 um | Span = 2.180E+00 | Uniformity = 6.453E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 2.50 | 0.06 | 2.90 | 6.63 | 0.35 | 7.72 | 16.78 |
| 0.06 | 3.50 | 0.07 | 6.79 | 7.72 | 0.34 | 9.00 | 19.12 |
| 0.07 | 3.42 | 0.08 | 10.21 | 9.00 | 0.30 | 10.48 | 19.43 |
| 0.08 | 2.32 | 0.09 | 12.53 | 10.48 | 0.25 | 12.21 | 19.67 |
| 0.09 | 1.32 | 0.11 | 13.86 | 12.21 | 0.18 | 14.22 | 19.85 |
| 0.11 | 0.69 | 0.13 | 14.55 | 14.22 | 0.13 | 16.57 | 19.98 |
| 0.13 | 0.36 | 0.15 | 14.91 | 16.57 | 0.13 | 19.31 | 20.11 |
| 0.15 | 0.20 | 0.17 | 15.11 | 19.31 | 0.23 | 22.49 | 20.34 |
| 0.17 | 0.13 | 0.20 | 15.24 | 22.49 | 0.46 | 26.20 | 20.80 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 15.33 | 26.20 | 0.85 | 30.53 | 21.65 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 15.40 | 30.53 | 1.50 | 35.56 | 23.15 |
| 0.27 | 0.05 | 0.31 | 15.45 | 35.56 | 2.50 | 41.43 | 25.65 |
| 0.31 | 0.04 | 0.36 | 15.49 | 41.43 | 3.96 | 48.27 | 29.61 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 15.52 | 48.27 | 5.73 | 56.23 | 35.34 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 15.55 | 56.23 | 7.48 | 65.51 | 42.82 |
| 0.49 | 0.03 | 0.58 | 15.58 | 65.51 | 8.69 | 76.32 | 51.51 |
| 0.58 | 0.03 | 0.67 | 15.60 | 76.32 | 9.21 | 89.91 | 60.72 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 15.64 | 88.91 | 9.36 | 103.58 | 70.08 |
| 0.78 | 0.06 | 0.91 | 15.69 | 103.58 | 8.24 | 120.67 | 78.32 |
| 0.91 | 0.08 | 1.06 | 15.78 | 120.67 | 6.77 | 140.58 | 85.09 |
| 1.06 | 0.11 | 1.24 | 15.89 | 140.58 | 5.20 | 163.77 | 90.29 |
| 1.24 | 0.13 | 1.44 | 16.02 | 163.77 | 3.79 | 190.80 | 94.08 |
| 1.44 | 0.15 | 1.68 | 16.17 | 190.80 | 2.64 | 222.28 | 96.72 |
| 1.68 | 0.18 | 1.95 | 16.35 | 222.28 | 1.74 | 258.95 | 98.45 |
| 1.95 | 0.20 | 2.28 | 16.55 | 258.95 | 1.04 | 301.68 | 99.50 |
| 2.28 | 0.21 | 2.65 | 16.76 | 301.68 | 0.50 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.22 | 3.09 | 16.98 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.24 | 3.60 | 17.22 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.26 | 4.19 | 17.45 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.25 | 4.85 | 17.78 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.85 | 0.32 | 5.69 | 18.09 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.34 | 6.63 | 18.43 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารศูนย์ 2 จุฬาลงกรณ์ ชั้น 62 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ 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

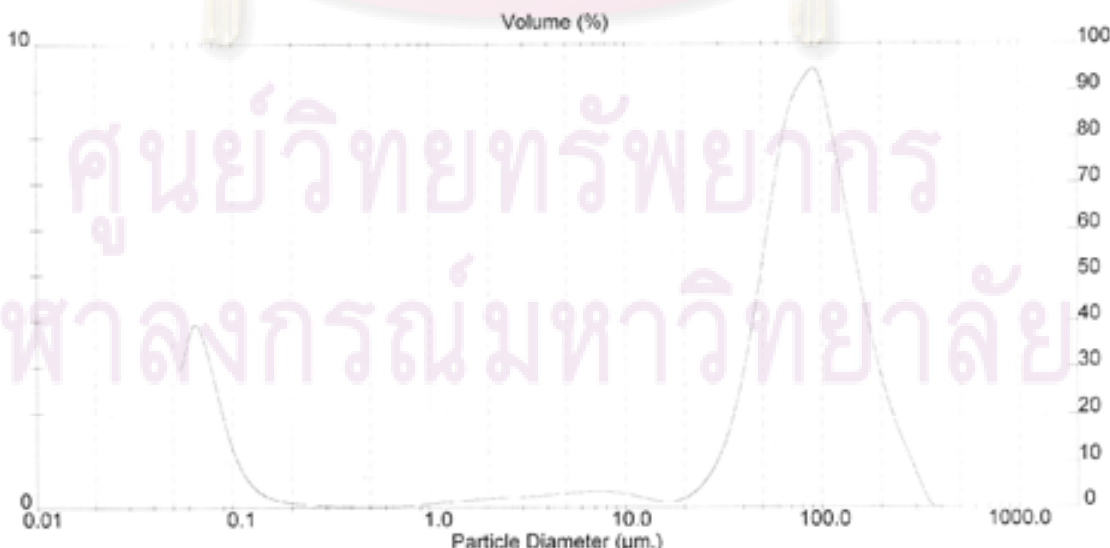
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) No.400 | Run Number: 6 | Measured: 26 Sep 2006 12:39PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 512 | Analysed: 26 Sep 2006 12:35PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 15.3 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.404 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0179 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 13.0323 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.08 um | D [v, 0.5] = 74.24 um | D [v, 0.9] = 161.70 um |
| D [4, 3] = 60.64 um | D [3, 2] = 0.46 um | Span = 2.177E+00 | Uniformity = 6.437E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 2.89 | 0.06 | 2.89 | 6.63 | 0.35 | 7.72 | 16.82 |
| 0.06 | 3.50 | 0.07 | 6.78 | 7.72 | 0.34 | 9.00 | 19.16 |
| 0.07 | 3.42 | 0.08 | 10.21 | 9.00 | 0.31 | 10.48 | 19.47 |
| 0.08 | 2.33 | 0.09 | 12.64 | 10.48 | 0.25 | 12.21 | 19.72 |
| 0.09 | 1.33 | 0.11 | 13.68 | 12.21 | 0.18 | 14.22 | 19.90 |
| 0.11 | 0.69 | 0.13 | 14.58 | 14.22 | 0.13 | 16.57 | 20.03 |
| 0.13 | 0.36 | 0.15 | 14.92 | 16.57 | 0.13 | 19.31 | 20.16 |
| 0.15 | 0.21 | 0.17 | 15.13 | 19.31 | 0.23 | 22.49 | 20.30 |
| 0.17 | 0.13 | 0.20 | 15.26 | 22.49 | 0.45 | 26.20 | 20.84 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 15.35 | 26.20 | 0.85 | 30.53 | 21.69 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 15.42 | 30.53 | 1.49 | 35.56 | 23.18 |
| 0.27 | 0.05 | 0.31 | 15.47 | 35.56 | 2.50 | 41.43 | 25.67 |
| 0.31 | 0.04 | 0.36 | 15.51 | 41.43 | 3.96 | 48.27 | 29.64 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 15.54 | 48.27 | 5.75 | 56.23 | 35.38 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 15.56 | 56.23 | 7.52 | 65.51 | 42.90 |
| 0.49 | 0.03 | 0.58 | 15.59 | 65.51 | 8.73 | 76.32 | 51.63 |
| 0.58 | 0.03 | 0.67 | 15.62 | 76.32 | 9.24 | 88.91 | 60.87 |
| 0.67 | 0.04 | 0.78 | 15.65 | 88.91 | 9.37 | 103.58 | 70.24 |
| 0.78 | 0.06 | 0.91 | 15.71 | 103.58 | 8.23 | 120.67 | 78.47 |
| 0.91 | 0.08 | 1.06 | 15.79 | 120.67 | 6.75 | 140.58 | 85.21 |
| 1.06 | 0.11 | 1.24 | 15.90 | 140.58 | 5.16 | 163.77 | 90.38 |
| 1.24 | 0.13 | 1.44 | 16.04 | 163.77 | 3.77 | 190.80 | 94.14 |
| 1.44 | 0.16 | 1.68 | 16.19 | 190.80 | 2.63 | 222.28 | 95.77 |
| 1.68 | 0.18 | 1.95 | 16.38 | 222.28 | 1.75 | 258.95 | 98.52 |
| 1.95 | 0.20 | 2.28 | 16.57 | 258.95 | 1.06 | 301.68 | 99.60 |
| 2.28 | 0.21 | 2.66 | 16.78 | 301.68 | 0.40 | 351.46 | 100.00 |
| 2.66 | 0.23 | 3.09 | 17.01 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.24 | 3.60 | 17.25 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.26 | 4.19 | 17.52 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.29 | 4.88 | 17.81 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.32 | 5.69 | 18.12 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.34 | 6.63 | 18.47 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





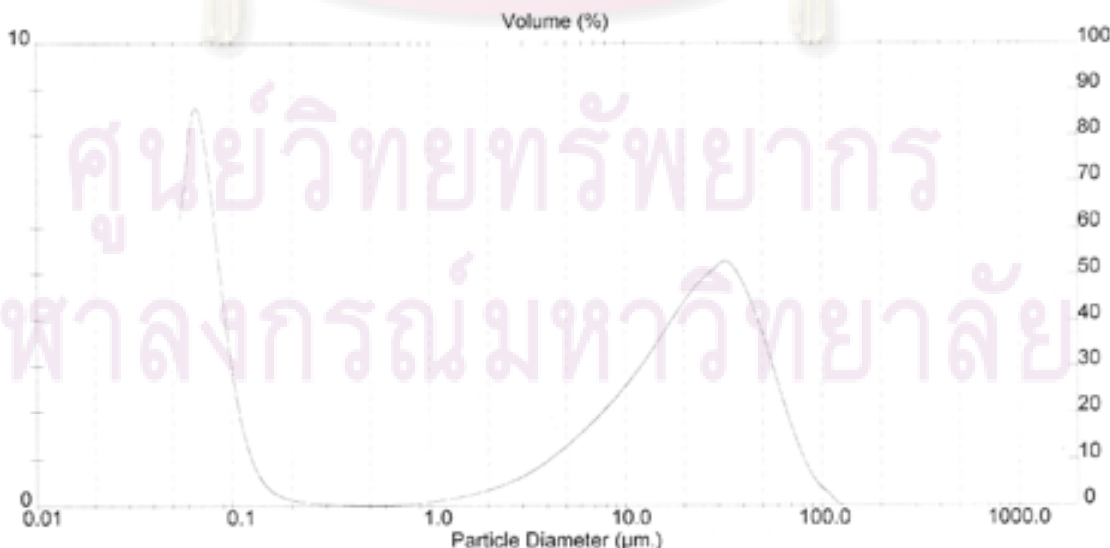
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HQ) Pan | Run Number: 5 | Measured: 26 Sep 2006 10:55PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 471 | Analysed: 26 Sep 2006 10:55PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 30CRF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 20.7 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.998 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0116 %/vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 26.3049 sq. m / g |
| Mean Diameters | D [v, 0.1] = 0.06 um | D [v, 0.5] = 11.71 um | D [v, 0.9] = 47.06 um |
| D [4, 3] = 16.65 um | D [3, 2] = 6.21 um | Span = 4.015E+00 | Uniformity = 1.349E+00 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 6.13 | 0.06 | 6.14 | 6.63 | 1.96 | 7.72 | 43.37 |
| 0.06 | 8.48 | 0.07 | 14.62 | 7.72 | 2.15 | 9.00 | 45.52 |
| 0.07 | 7.64 | 0.08 | 22.25 | 9.00 | 2.47 | 10.48 | 47.99 |
| 0.08 | 5.27 | 0.09 | 27.52 | 10.48 | 2.82 | 12.21 | 50.82 |
| 0.09 | 2.97 | 0.11 | 30.49 | 12.21 | 3.22 | 14.22 | 54.04 |
| 0.11 | 1.47 | 0.13 | 31.96 | 14.22 | 3.65 | 16.57 | 57.69 |
| 0.13 | 0.69 | 0.15 | 32.65 | 16.57 | 4.09 | 19.31 | 61.77 |
| 0.15 | 0.33 | 0.17 | 32.99 | 19.31 | 4.49 | 22.49 | 66.27 |
| 0.17 | 0.18 | 0.20 | 33.16 | 22.49 | 4.83 | 26.20 | 71.10 |
| 0.20 | 0.10 | 0.23 | 33.26 | 26.20 | 5.08 | 30.53 | 76.18 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 33.32 | 30.53 | 5.26 | 35.56 | 81.43 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 33.36 | 35.56 | 4.92 | 41.43 | 86.36 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 33.39 | 41.43 | 4.30 | 48.27 | 90.66 |
| 0.36 | 0.02 | 0.42 | 33.41 | 48.27 | 3.47 | 56.23 | 94.13 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 33.42 | 56.23 | 2.55 | 65.51 | 96.68 |
| 0.49 | 0.01 | 0.58 | 33.44 | 65.51 | 1.88 | 76.32 | 98.36 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 33.45 | 76.32 | 0.96 | 88.91 | 99.32 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 33.48 | 88.91 | 0.47 | 103.58 | 99.79 |
| 0.78 | 0.04 | 0.91 | 33.52 | 103.58 | 0.21 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.08 | 1.06 | 33.60 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 33.71 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.16 | 1.44 | 33.87 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.22 | 1.68 | 34.09 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.29 | 1.95 | 34.38 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.37 | 2.28 | 34.74 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.46 | 2.65 | 35.21 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.58 | 3.09 | 35.79 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.74 | 3.60 | 36.53 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.91 | 4.19 | 37.44 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.12 | 4.88 | 38.56 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.35 | 5.69 | 39.91 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.60 | 6.63 | 41.51 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน 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

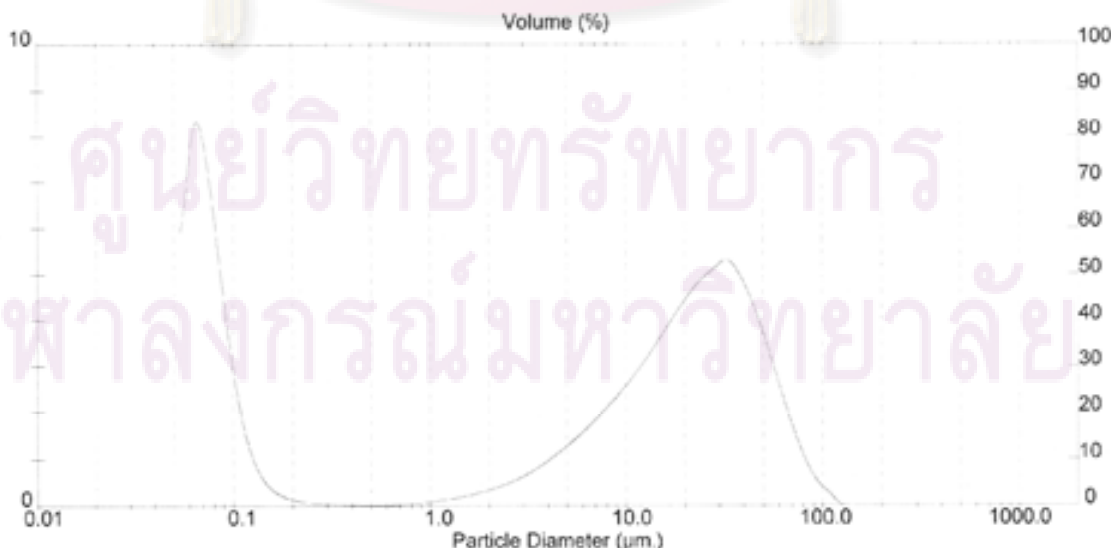
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) Pan | Run Number: 7 | Measured: 26 Sep 2006 10:55PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 473 | Analysed: 26 Sep 2006 10:55PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 20.2 % |
| Presentation: 3DHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.797 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0114 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 27.6239 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.66 um | D [v, 0.5] = 11.97 um | D [v, 0.9] = 47.25 um |
| D [4, 3] = 18.22 um | D [3, 2] = 0.22 um | Span = 3.942E+00 | Uniformity = 1.323E+00 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 5.86 | 0.08 | 5.88 | 6.03 | 1.85 | 7.72 | 42.87 |
| 0.06 | 8.18 | 0.07 | 14.04 | 7.72 | 2.17 | 9.00 | 45.04 |
| 0.07 | 7.46 | 0.08 | 21.50 | 9.00 | 2.50 | 10.48 | 47.54 |
| 0.08 | 5.23 | 0.09 | 26.73 | 10.48 | 2.86 | 12.21 | 50.39 |
| 0.09 | 3.01 | 0.11 | 29.74 | 12.21 | 3.26 | 14.22 | 53.65 |
| 0.11 | 1.52 | 0.13 | 31.26 | 14.22 | 3.69 | 16.57 | 57.34 |
| 0.13 | 0.73 | 0.15 | 31.99 | 16.57 | 4.13 | 19.31 | 61.47 |
| 0.15 | 0.38 | 0.17 | 32.34 | 19.31 | 4.54 | 22.49 | 66.01 |
| 0.17 | 0.19 | 0.20 | 32.53 | 22.49 | 4.87 | 26.20 | 70.88 |
| 0.20 | 0.11 | 0.23 | 32.63 | 26.20 | 5.12 | 30.53 | 76.00 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 32.70 | 30.53 | 5.29 | 35.58 | 81.29 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 32.74 | 35.58 | 4.95 | 41.43 | 86.24 |
| 0.31 | 0.03 | 0.38 | 32.78 | 41.43 | 4.32 | 48.27 | 90.56 |
| 0.36 | 0.02 | 0.42 | 32.78 | 48.27 | 3.49 | 56.23 | 94.05 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 32.80 | 56.23 | 2.57 | 65.51 | 96.62 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 32.82 | 65.51 | 1.70 | 76.32 | 98.32 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 32.83 | 76.32 | 0.98 | 88.91 | 99.30 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 32.85 | 88.91 | 0.49 | 103.58 | 99.79 |
| 0.78 | 0.05 | 0.91 | 32.90 | 103.58 | 0.21 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.08 | 1.06 | 32.98 | 120.67 | 0.00 | 140.88 | 100.00 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 33.10 | 140.88 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.16 | 1.44 | 33.28 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.22 | 1.68 | 33.48 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.29 | 1.95 | 33.78 | 222.28 | 0.00 | 268.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.37 | 2.28 | 34.15 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.47 | 2.85 | 34.62 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.85 | 0.59 | 3.09 | 35.21 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.74 | 3.60 | 35.95 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.92 | 4.19 | 36.88 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.13 | 4.88 | 38.01 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.36 | 5.69 | 39.37 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.61 | 6.63 | 40.99 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารศูนย์ 2 จุฬาลงกรณ์ ชั้น 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2146211
 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. 2146211

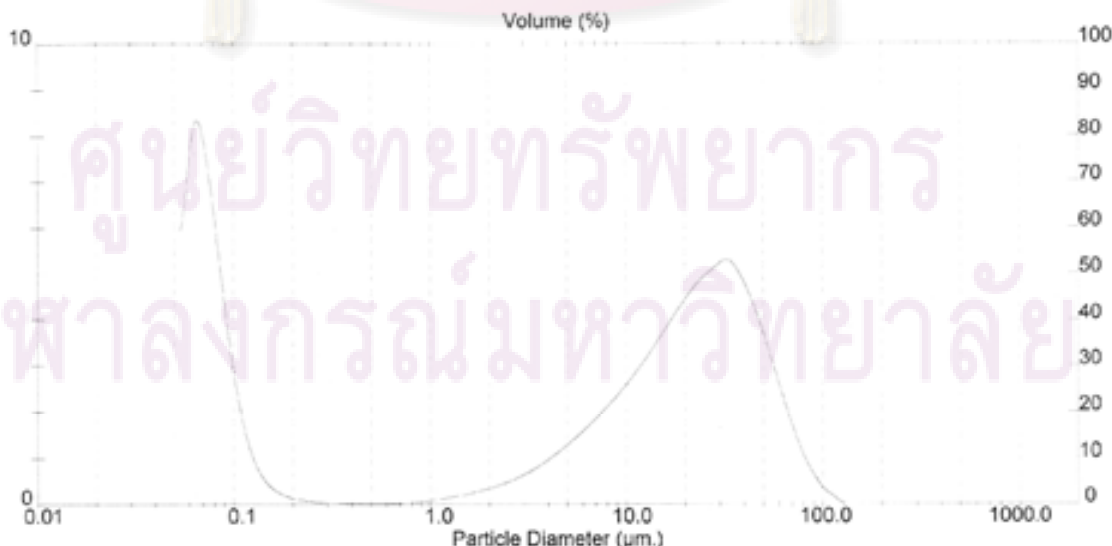
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (HC) Pan | Run Number: 9 | Measured: 26 Sep 2006 10:55PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 474 | Analysed: 26 Sep 2006 10:55PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 20.2 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.816 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0114 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 27.7173 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.66 um | D [v, 0.5] = 11.97 um | D [v, 0.9] = 47.02 um |
| D [4, 3] = 18.11 um | D [3, 2] = 0.22 um | Span = 3.956E+00 | Uniformity = 1.328E+00 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 5.89 | 0.06 | 5.89 | 6.03 | 1.89 | 7.72 | 43.02 |
| 0.06 | 8.21 | 0.07 | 14.10 | 7.72 | 2.18 | 9.00 | 45.20 |
| 0.07 | 7.48 | 0.08 | 21.58 | 9.00 | 2.50 | 10.48 | 47.70 |
| 0.08 | 5.24 | 0.09 | 26.83 | 10.48 | 2.86 | 12.21 | 50.56 |
| 0.09 | 3.01 | 0.11 | 29.84 | 12.21 | 3.26 | 14.22 | 53.82 |
| 0.11 | 1.52 | 0.13 | 31.35 | 14.22 | 3.69 | 16.57 | 57.51 |
| 0.13 | 0.73 | 0.15 | 32.08 | 16.57 | 4.13 | 19.31 | 61.94 |
| 0.15 | 0.38 | 0.17 | 32.44 | 19.31 | 4.54 | 22.49 | 66.17 |
| 0.17 | 0.19 | 0.20 | 32.63 | 22.49 | 4.87 | 26.20 | 71.04 |
| 0.20 | 0.11 | 0.23 | 32.73 | 26.20 | 5.12 | 30.53 | 76.16 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 32.83 | 30.53 | 5.28 | 35.56 | 81.44 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 32.84 | 35.56 | 4.94 | 41.43 | 86.38 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 32.87 | 41.43 | 4.30 | 48.27 | 90.88 |
| 0.36 | 0.02 | 0.42 | 32.89 | 48.27 | 3.47 | 56.23 | 94.15 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 32.91 | 56.23 | 2.55 | 65.51 | 96.70 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 32.92 | 65.51 | 1.67 | 76.32 | 98.37 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 32.94 | 76.32 | 0.96 | 88.91 | 99.33 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 32.97 | 88.91 | 0.47 | 103.58 | 99.80 |
| 0.78 | 0.05 | 0.91 | 33.01 | 103.58 | 0.20 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.08 | 1.06 | 33.09 | 120.67 | 0.00 | 140.88 | 100.00 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 33.21 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.17 | 1.44 | 33.38 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.22 | 1.68 | 33.60 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.30 | 1.95 | 33.90 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.37 | 2.28 | 34.27 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.47 | 2.65 | 34.74 | 301.88 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.59 | 3.09 | 35.34 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.75 | 3.60 | 36.09 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.93 | 4.19 | 37.01 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.13 | 4.88 | 38.15 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.37 | 5.69 | 39.51 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.62 | 6.63 | 41.13 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ กรุงเทพมหานคร 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

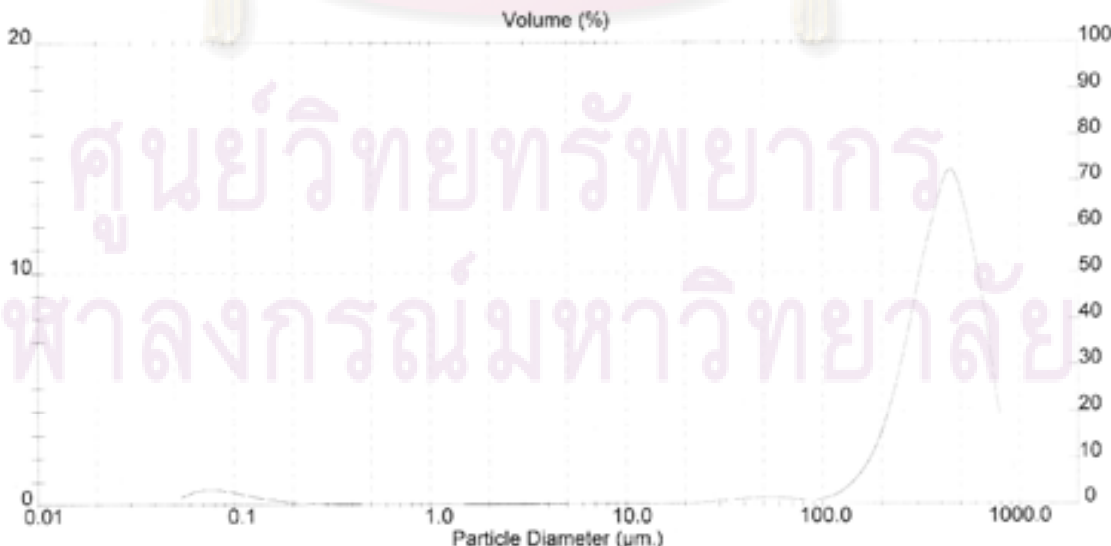
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No 60 | Run Number: 3 | Measured: 26 Sep 2006 15:36PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 550 | Analysed: 26 Sep 2006 15:37PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 12.6 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 1.175 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0557 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 2.7546 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 174.76 um | D [v, 0.5] = 401.79 um | D [v, 0.9] = 691.98 um |
| D [4, 3] = 404.01 um | D [3, 2] = 2.18 um | Span = 1.187E+00 | Uniformity = 3.722E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.33 | 0.06 | 0.33 | 5.63 | 0.06 | 7.72 | 4.56 |
| 0.06 | 0.55 | 0.07 | 0.88 | 7.72 | 0.07 | 9.00 | 4.63 |
| 0.07 | 0.65 | 0.08 | 1.52 | 9.00 | 0.07 | 10.48 | 4.69 |
| 0.08 | 0.63 | 0.09 | 2.16 | 10.48 | 0.06 | 12.21 | 4.76 |
| 0.09 | 0.54 | 0.11 | 2.89 | 12.21 | 0.05 | 14.22 | 4.81 |
| 0.11 | 0.41 | 0.13 | 3.11 | 14.22 | 0.05 | 16.57 | 4.86 |
| 0.13 | 0.30 | 0.15 | 3.40 | 16.57 | 0.05 | 19.31 | 4.91 |
| 0.15 | 0.21 | 0.17 | 3.61 | 19.31 | 0.06 | 22.49 | 4.97 |
| 0.17 | 0.14 | 0.20 | 3.75 | 22.49 | 0.08 | 26.20 | 5.05 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 3.84 | 26.20 | 0.12 | 30.53 | 5.18 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 3.90 | 30.53 | 0.17 | 35.56 | 5.35 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 3.94 | 35.56 | 0.22 | 41.43 | 5.57 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 3.98 | 41.43 | 0.27 | 48.27 | 5.84 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 4.00 | 48.27 | 0.29 | 56.23 | 6.13 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 4.03 | 56.23 | 0.28 | 65.51 | 6.41 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 4.04 | 65.51 | 0.23 | 76.32 | 6.64 |
| 0.58 | 0.01 | 0.67 | 4.06 | 76.32 | 0.18 | 88.91 | 6.82 |
| 0.67 | 0.01 | 0.78 | 4.07 | 88.91 | 0.20 | 103.58 | 7.02 |
| 0.78 | 0.01 | 0.91 | 4.09 | 103.58 | 0.34 | 120.67 | 7.35 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 4.10 | 120.67 | 0.67 | 140.58 | 8.03 |
| 1.06 | 0.02 | 1.24 | 4.12 | 140.58 | 1.22 | 163.77 | 9.24 |
| 1.24 | 0.02 | 1.44 | 4.14 | 163.77 | 2.08 | 190.80 | 11.32 |
| 1.44 | 0.02 | 1.68 | 4.17 | 190.80 | 3.41 | 222.28 | 14.73 |
| 1.68 | 0.03 | 1.95 | 4.19 | 222.28 | 5.38 | 258.95 | 20.11 |
| 1.95 | 0.03 | 2.28 | 4.22 | 258.95 | 7.96 | 301.68 | 25.07 |
| 2.28 | 0.03 | 2.65 | 4.25 | 301.68 | 10.69 | 351.46 | 38.76 |
| 2.65 | 0.03 | 3.09 | 4.28 | 351.46 | 12.95 | 409.45 | 51.71 |
| 3.09 | 0.03 | 3.60 | 4.31 | 409.45 | 14.41 | 477.01 | 66.12 |
| 3.60 | 0.04 | 4.19 | 4.35 | 477.01 | 13.12 | 555.71 | 79.24 |
| 4.19 | 0.04 | 4.88 | 4.39 | 555.71 | 10.43 | 647.41 | 89.64 |
| 4.88 | 0.05 | 5.69 | 4.44 | 647.41 | 6.96 | 754.23 | 96.61 |
| 5.69 | 0.06 | 6.63 | 4.50 | 754.23 | 3.39 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฝ่ายอุปกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถาบัน 2 ขุขันธ์ ๒๒ ๒๒๒ ๒๒๒ ถนนวิภาวดีรังสิต กรุงเทพฯ ๑๐๓๓๐ โทร ๒๑๘๘๐๒๙-๓๒, ๒๑๘๘๑๐๑ โทรสาร ๒๑๔๐๒๑๑
 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

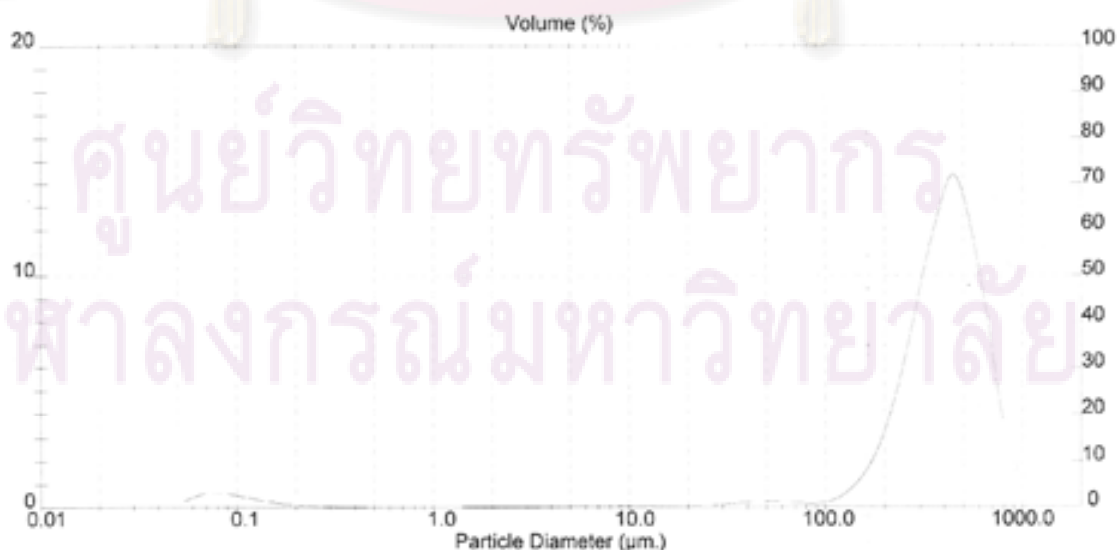
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.60 | Run Number: 6 | Measured: 26 Sep 2006 15:37PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 553 | Analysed: 26 Sep 2006 15:37PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 13.1 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000)] | Dispersant R.I. = 1.3300 | Residual: 1.554 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0585 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 2.8870 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 176.43 um | D [v, 0.5] = 399.29 um | D [v, 0.9] = 648.59 um |
| D [4, 3] = 402.04 um | D [3, 2] = 2.23 um | Span = 1.185E+00 | Uniformity = 3.729E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.30 | 0.06 | 0.30 | 6.63 | 0.06 | 7.72 | 4.52 |
| 0.06 | 0.52 | 0.07 | 0.82 | 7.72 | 0.07 | 9.00 | 4.59 |
| 0.07 | 0.62 | 0.08 | 1.45 | 9.00 | 0.07 | 10.48 | 4.66 |
| 0.08 | 0.62 | 0.09 | 2.06 | 10.48 | 0.07 | 12.21 | 4.73 |
| 0.09 | 0.54 | 0.11 | 2.60 | 12.21 | 0.06 | 14.22 | 4.79 |
| 0.11 | 0.42 | 0.13 | 3.03 | 14.22 | 0.05 | 16.57 | 4.84 |
| 0.13 | 0.31 | 0.15 | 3.34 | 16.57 | 0.05 | 19.31 | 4.89 |
| 0.15 | 0.21 | 0.17 | 3.55 | 19.31 | 0.05 | 22.49 | 4.94 |
| 0.17 | 0.14 | 0.20 | 3.69 | 22.49 | 0.08 | 26.20 | 5.02 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 3.79 | 26.20 | 0.11 | 30.53 | 5.13 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 3.85 | 30.53 | 0.16 | 35.56 | 5.29 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 3.89 | 35.56 | 0.20 | 41.43 | 5.49 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 3.92 | 41.43 | 0.24 | 48.27 | 5.73 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 3.95 | 48.27 | 0.28 | 56.23 | 6.00 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 3.97 | 56.23 | 0.25 | 65.51 | 6.24 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 3.99 | 65.51 | 0.21 | 76.32 | 6.45 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 4.00 | 76.32 | 0.17 | 88.91 | 6.62 |
| 0.67 | 0.01 | 0.78 | 4.02 | 88.91 | 0.19 | 103.58 | 6.81 |
| 0.78 | 0.02 | 0.91 | 4.03 | 103.58 | 0.35 | 120.67 | 7.15 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 4.05 | 120.67 | 0.70 | 140.58 | 7.85 |
| 1.06 | 0.02 | 1.24 | 4.07 | 140.58 | 1.29 | 163.77 | 9.14 |
| 1.24 | 0.02 | 1.44 | 4.09 | 163.77 | 2.21 | 190.80 | 11.35 |
| 1.44 | 0.02 | 1.68 | 4.12 | 190.80 | 3.90 | 222.28 | 14.95 |
| 1.68 | 0.03 | 1.95 | 4.14 | 222.28 | 5.58 | 258.95 | 20.53 |
| 1.95 | 0.03 | 2.28 | 4.17 | 258.95 | 8.10 | 301.68 | 28.60 |
| 2.28 | 0.03 | 2.66 | 4.20 | 301.68 | 10.72 | 351.46 | 39.35 |
| 2.66 | 0.03 | 3.00 | 4.23 | 351.46 | 12.91 | 409.45 | 52.27 |
| 3.00 | 0.03 | 3.60 | 4.27 | 409.45 | 14.34 | 477.01 | 66.60 |
| 3.60 | 0.04 | 4.19 | 4.31 | 477.01 | 13.04 | 555.71 | 79.64 |
| 4.19 | 0.04 | 4.88 | 4.35 | 555.71 | 10.26 | 647.41 | 89.90 |
| 4.88 | 0.05 | 5.69 | 4.40 | 647.41 | 6.79 | 754.23 | 95.69 |
| 5.69 | 0.06 | 6.63 | 4.46 | 754.23 | 3.31 | 878.67 | 100.00 |





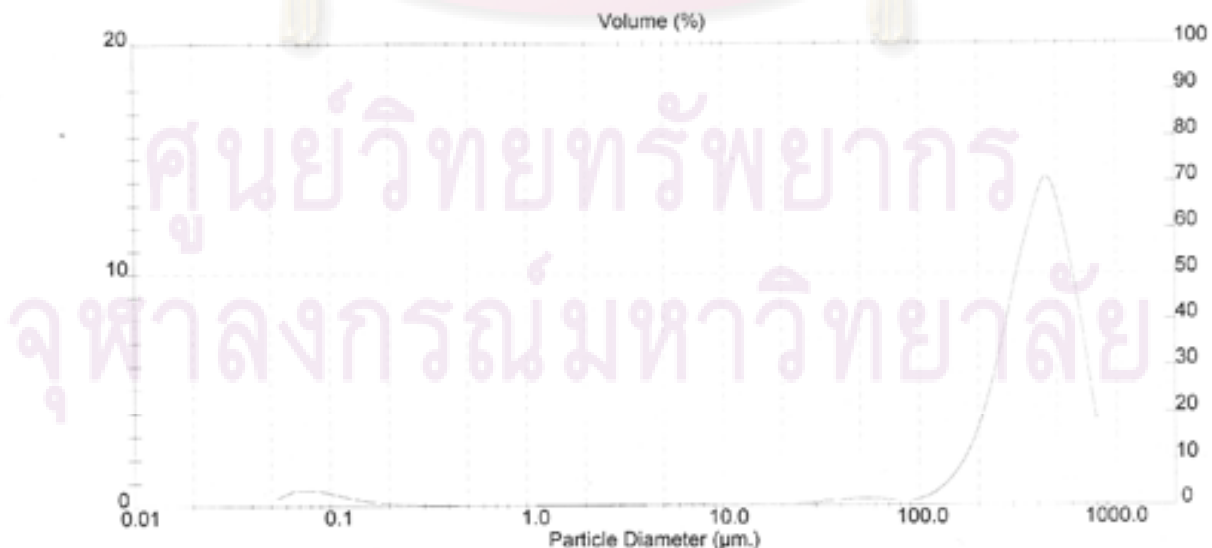
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.60 | Run Number: 9 | Measured: 26 Sep 2006 15:37PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 556 | Analysed: 26 Sep 2006 15:37PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: M51 | Obscuration: 12.6 % |
| Presentation: 3CHD | [Particle R.I. = (1.5225, 0.1000): | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 1.197 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0528 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 2.9267 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 153.97 um | D [v, 0.5] = 396.09 um | D [v, 0.9] = 647.95 um |
| D [4, 3] = 398.17 um | D [3, 2] = 2.05 um | Span = 1.222E+00 | Uniformity = 3.856E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.36 | 0.05 | 0.36 | 6.63 | 0.05 | 7.72 | 4.85 |
| 0.06 | 0.60 | 0.07 | 0.96 | 7.72 | 0.08 | 9.00 | 4.93 |
| 0.07 | 0.70 | 0.08 | 1.66 | 9.00 | 0.08 | 10.48 | 5.02 |
| 0.08 | 0.67 | 0.09 | 2.33 | 10.48 | 0.08 | 12.21 | 5.10 |
| 0.09 | 0.56 | 0.11 | 2.89 | 12.21 | 0.07 | 14.22 | 5.17 |
| 0.11 | 0.42 | 0.13 | 3.31 | 14.22 | 0.06 | 16.57 | 5.24 |
| 0.13 | 0.30 | 0.15 | 3.51 | 16.57 | 0.06 | 19.31 | 5.30 |
| 0.15 | 0.20 | 0.17 | 3.82 | 19.31 | 0.07 | 22.49 | 5.36 |
| 0.17 | 0.13 | 0.20 | 3.95 | 22.49 | 0.09 | 26.20 | 5.45 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 4.04 | 26.20 | 0.12 | 30.53 | 5.57 |
| 0.23 | 0.05 | 0.27 | 4.09 | 30.53 | 0.17 | 35.56 | 5.74 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 4.14 | 35.56 | 0.22 | 41.43 | 5.96 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 4.17 | 41.43 | 0.27 | 48.27 | 6.23 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 4.19 | 48.27 | 0.29 | 56.23 | 6.52 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 4.22 | 56.23 | 0.28 | 65.51 | 6.80 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 4.24 | 65.51 | 0.24 | 76.32 | 7.04 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 4.25 | 76.32 | 0.20 | 88.91 | 7.25 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 4.27 | 88.91 | 0.23 | 103.58 | 7.48 |
| 0.78 | 0.02 | 0.91 | 4.28 | 103.58 | 0.40 | 120.67 | 7.88 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 4.31 | 120.67 | 0.76 | 140.58 | 8.64 |
| 1.06 | 0.02 | 1.24 | 4.33 | 140.58 | 1.35 | 163.77 | 9.99 |
| 1.24 | 0.03 | 1.44 | 4.36 | 163.77 | 2.24 | 190.80 | 12.23 |
| 1.44 | 0.03 | 1.68 | 4.38 | 190.80 | 3.60 | 222.28 | 15.83 |
| 1.68 | 0.03 | 1.95 | 4.42 | 222.28 | 5.57 | 258.95 | 21.41 |
| 1.95 | 0.03 | 2.28 | 4.46 | 258.95 | 8.07 | 301.68 | 29.48 |
| 2.28 | 0.03 | 2.65 | 4.48 | 301.68 | 10.67 | 351.46 | 40.15 |
| 2.65 | 0.04 | 3.09 | 4.52 | 351.46 | 12.79 | 409.45 | 52.94 |
| 3.09 | 0.04 | 3.60 | 4.56 | 409.45 | 14.15 | 477.01 | 67.09 |
| 3.60 | 0.04 | 4.19 | 4.60 | 477.01 | 12.79 | 555.71 | 79.88 |
| 4.19 | 0.05 | 4.88 | 4.65 | 555.71 | 10.07 | 647.41 | 89.95 |
| 4.88 | 0.06 | 5.69 | 4.71 | 647.41 | 6.74 | 754.23 | 95.70 |
| 5.69 | 0.07 | 6.63 | 4.78 | 754.23 | 3.30 | 878.67 | 100.00 |





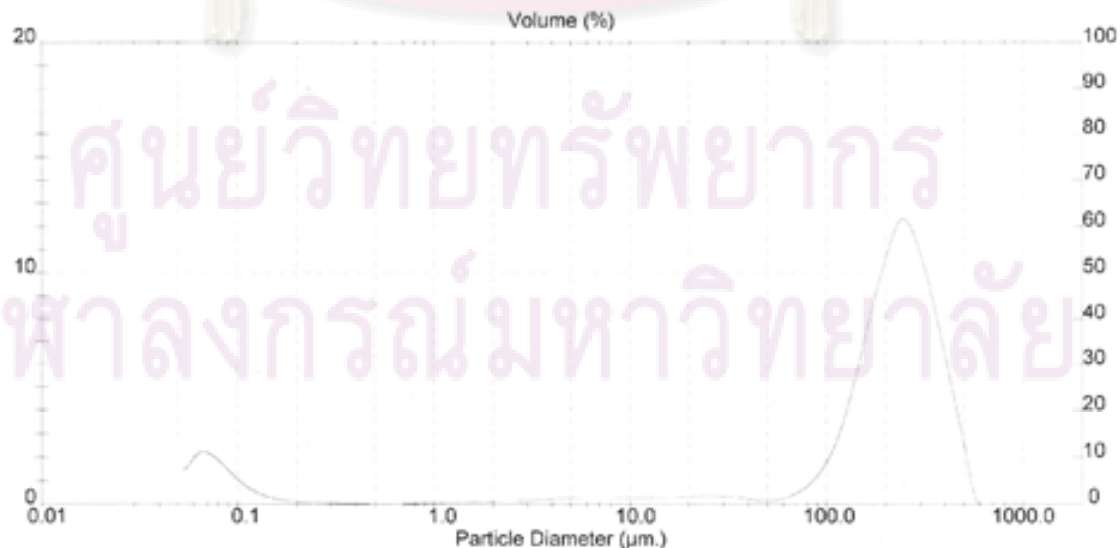
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.120 | Run Number: 3 | Measured: 26 Sep 2006 15:29PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 540 | Analysed: 26 Sep 2006 15:29PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 16.2 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.381 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0294 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 8.0239 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.24 um | D [v, 0.5] = 214.38 um | D [v, 0.9] = 377.80 um |
| D [4, 3] = 211.43 um | D [3, 2] = 0.75 um | Span = 1.761E+03 | Uniformity = 4.765E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.46 | 0.06 | 1.46 | 6.63 | 0.30 | 7.72 | 12.61 |
| 0.06 | 2.14 | 0.07 | 3.60 | 7.72 | 0.29 | 9.00 | 12.90 |
| 0.07 | 2.11 | 0.08 | 5.71 | 9.00 | 0.28 | 10.48 | 13.18 |
| 0.08 | 1.65 | 0.09 | 7.30 | 10.48 | 0.27 | 12.21 | 13.45 |
| 0.09 | 1.10 | 0.11 | 8.40 | 12.21 | 0.27 | 14.22 | 13.72 |
| 0.11 | 0.67 | 0.13 | 9.12 | 14.22 | 0.29 | 16.57 | 14.01 |
| 0.13 | 0.39 | 0.15 | 9.51 | 16.57 | 0.31 | 19.31 | 14.32 |
| 0.15 | 0.23 | 0.17 | 9.74 | 19.31 | 0.34 | 22.49 | 14.65 |
| 0.17 | 0.14 | 0.20 | 9.89 | 22.49 | 0.35 | 26.20 | 15.01 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 9.98 | 26.20 | 0.35 | 30.53 | 15.36 |
| 0.23 | 0.06 | 0.27 | 10.04 | 30.53 | 0.31 | 35.56 | 15.67 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 10.06 | 35.56 | 0.24 | 41.43 | 15.91 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 10.12 | 41.43 | 0.17 | 48.27 | 16.08 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 10.15 | 48.27 | 0.15 | 56.23 | 16.23 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 10.17 | 56.23 | 0.24 | 65.51 | 16.48 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 10.19 | 65.51 | 0.47 | 76.32 | 16.94 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 10.21 | 76.32 | 0.86 | 88.91 | 17.80 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 10.24 | 88.91 | 1.51 | 103.58 | 19.31 |
| 0.78 | 0.03 | 0.91 | 10.27 | 103.58 | 2.59 | 120.87 | 21.90 |
| 0.91 | 0.05 | 1.06 | 10.32 | 120.87 | 4.30 | 140.58 | 26.20 |
| 1.06 | 0.06 | 1.24 | 10.38 | 140.58 | 6.58 | 163.77 | 32.78 |
| 1.24 | 0.07 | 1.44 | 10.46 | 163.77 | 9.01 | 190.80 | 41.79 |
| 1.44 | 0.08 | 1.68 | 10.54 | 190.80 | 10.96 | 222.28 | 52.76 |
| 1.68 | 0.10 | 1.95 | 10.64 | 222.28 | 12.29 | 258.95 | 65.05 |
| 1.95 | 0.12 | 2.28 | 10.76 | 258.95 | 11.52 | 301.88 | 78.57 |
| 2.28 | 0.14 | 2.65 | 10.90 | 301.88 | 9.69 | 351.46 | 86.28 |
| 2.65 | 0.16 | 3.09 | 11.06 | 351.46 | 7.21 | 409.45 | 93.47 |
| 3.09 | 0.19 | 3.60 | 11.25 | 409.45 | 4.68 | 477.01 | 98.05 |
| 3.60 | 0.22 | 4.19 | 11.48 | 477.01 | 1.95 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.26 | 4.88 | 11.73 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.28 | 5.69 | 12.02 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.30 | 6.63 | 12.31 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 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

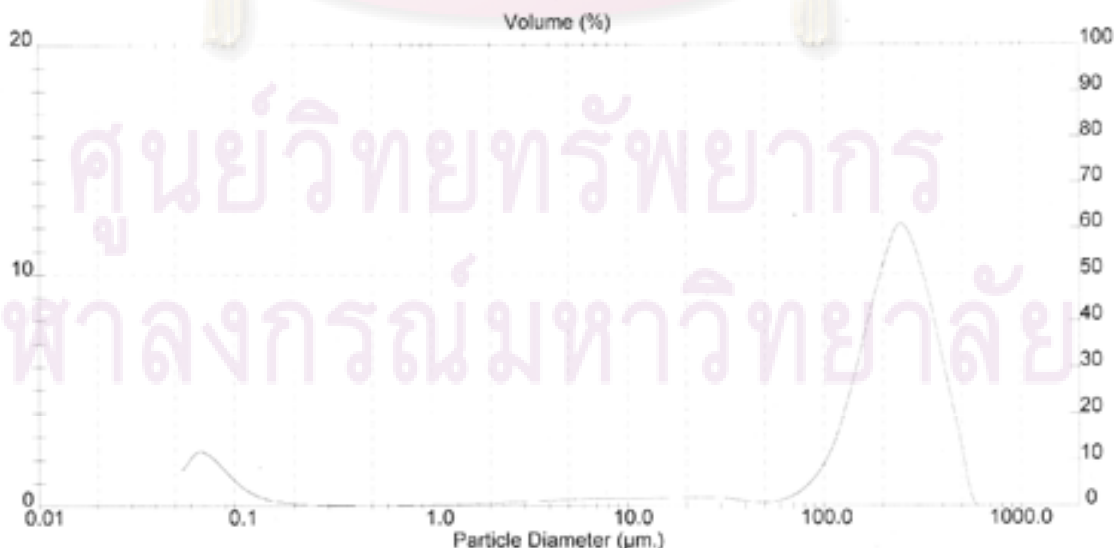
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.120 | Run Number: 6 | Measured: 26 Sep 2006 15:30PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 543 | Analysed: 26 Sep 2006 15:30PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: M51 | Obscuration: 16.5 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.436 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0280 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 6.4088 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.15 um | D [v, 0.5] = 213.89 um | D [v, 0.9] = 378.82 um |
| D [4, 3] = 210.27 um | D [3, 2] = 0.71 um | Span = 1.770E+00 | Uniformity = 4.853E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.55 | 0.06 | 1.55 | 6.63 | 0.31 | 7.72 | 13.13 |
| 0.06 | 2.27 | 0.07 | 3.82 | 7.72 | 0.31 | 9.00 | 13.44 |
| 0.07 | 2.22 | 0.08 | 6.04 | 9.00 | 0.31 | 10.48 | 13.75 |
| 0.08 | 1.72 | 0.08 | 7.77 | 10.48 | 0.31 | 12.21 | 14.06 |
| 0.09 | 1.13 | 0.11 | 8.90 | 12.21 | 0.31 | 14.22 | 14.37 |
| 0.11 | 0.68 | 0.13 | 9.58 | 14.22 | 0.33 | 16.57 | 14.70 |
| 0.13 | 0.39 | 0.15 | 9.96 | 16.57 | 0.36 | 19.31 | 15.06 |
| 0.15 | 0.22 | 0.17 | 10.19 | 19.31 | 0.37 | 22.49 | 15.43 |
| 0.17 | 0.13 | 0.20 | 10.32 | 22.49 | 0.38 | 26.20 | 15.80 |
| 0.20 | 0.08 | 0.23 | 10.40 | 26.20 | 0.36 | 30.53 | 16.16 |
| 0.23 | 0.05 | 0.27 | 10.46 | 30.53 | 0.31 | 35.56 | 16.47 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 10.49 | 35.56 | 0.23 | 41.43 | 16.70 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 10.52 | 41.43 | 0.16 | 48.27 | 16.86 |
| 0.36 | 0.02 | 0.42 | 10.55 | 48.27 | 0.15 | 56.23 | 17.01 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 10.57 | 56.23 | 0.23 | 65.51 | 17.25 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 10.59 | 65.51 | 0.46 | 76.32 | 17.71 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 10.61 | 76.32 | 0.86 | 88.91 | 18.67 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 10.63 | 88.91 | 1.53 | 103.58 | 20.09 |
| 0.78 | 0.04 | 0.91 | 10.67 | 103.58 | 2.61 | 120.67 | 22.70 |
| 0.91 | 0.06 | 1.06 | 10.73 | 120.67 | 4.27 | 140.58 | 26.97 |
| 1.06 | 0.07 | 1.24 | 10.80 | 140.58 | 6.44 | 163.77 | 33.41 |
| 1.24 | 0.08 | 1.44 | 10.88 | 163.77 | 8.75 | 190.80 | 42.17 |
| 1.44 | 0.09 | 1.68 | 10.97 | 190.80 | 10.70 | 222.28 | 52.87 |
| 1.68 | 0.11 | 1.95 | 11.08 | 222.28 | 12.11 | 258.95 | 64.98 |
| 1.95 | 0.13 | 2.28 | 11.21 | 258.95 | 11.44 | 301.68 | 78.42 |
| 2.28 | 0.16 | 2.65 | 11.36 | 301.68 | 9.69 | 351.46 | 86.11 |
| 2.65 | 0.17 | 3.09 | 11.53 | 351.46 | 7.25 | 409.45 | 93.36 |
| 3.09 | 0.20 | 3.60 | 11.73 | 409.45 | 4.63 | 477.01 | 97.99 |
| 3.60 | 0.23 | 4.19 | 11.96 | 477.01 | 2.01 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.26 | 4.88 | 12.22 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.29 | 5.69 | 12.51 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.31 | 6.63 | 12.82 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





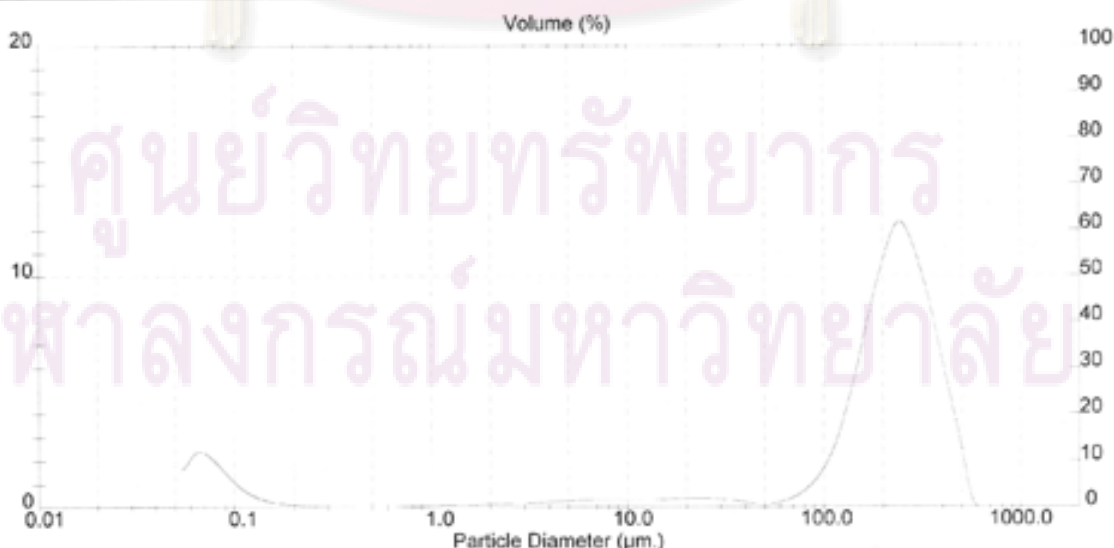
Analysis Result

| Sample Details | | |
|---|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.120 | Run Number: 7 | Measured: 26 Sep 2006 15:30PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 544 | Analysed: 26 Sep 2006 15:30PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System Dispersing Medium : Water Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 15.9 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000)] | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.423 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0296 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 8.4019 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.14 um | D [v, 0.5] = 214.30 um | D [v, 0.9] = 378.59 um |
| D [4, 3] = 210.61 um | D [3, 2] = 0.71 um | Span = 1.766E+00 | Uniformity = 4.819E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.60 | 0.06 | 1.60 | 6.63 | 0.31 | 7.72 | 13.13 |
| 0.06 | 2.32 | 0.07 | 3.92 | 7.72 | 0.31 | 9.00 | 13.44 |
| 0.07 | 2.24 | 0.08 | 6.17 | 9.00 | 0.31 | 10.48 | 13.75 |
| 0.08 | 1.72 | 0.09 | 7.88 | 10.48 | 0.31 | 12.21 | 14.07 |
| 0.09 | 1.11 | 0.11 | 9.00 | 12.21 | 0.32 | 14.22 | 14.39 |
| 0.11 | 0.65 | 0.13 | 9.85 | 14.22 | 0.34 | 16.57 | 14.73 |
| 0.13 | 0.37 | 0.15 | 10.03 | 16.57 | 0.37 | 19.31 | 15.10 |
| 0.15 | 0.21 | 0.17 | 10.24 | 19.31 | 0.38 | 22.49 | 15.48 |
| 0.17 | 0.13 | 0.20 | 10.37 | 22.49 | 0.38 | 26.20 | 15.87 |
| 0.20 | 0.08 | 0.23 | 10.45 | 26.20 | 0.36 | 30.53 | 16.22 |
| 0.23 | 0.05 | 0.27 | 10.50 | 30.53 | 0.30 | 35.56 | 16.53 |
| 0.27 | 0.04 | 0.31 | 10.54 | 35.56 | 0.23 | 41.43 | 16.75 |
| 0.31 | 0.03 | 0.36 | 10.57 | 41.43 | 0.15 | 48.27 | 16.91 |
| 0.36 | 0.02 | 0.42 | 10.59 | 48.27 | 0.13 | 56.23 | 17.04 |
| 0.42 | 0.02 | 0.49 | 10.61 | 56.23 | 0.21 | 65.51 | 17.25 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 10.63 | 65.51 | 0.42 | 76.32 | 17.66 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 10.66 | 76.32 | 0.79 | 88.91 | 18.45 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 10.68 | 88.91 | 1.42 | 103.58 | 19.87 |
| 0.78 | 0.04 | 0.91 | 10.72 | 103.58 | 2.47 | 120.67 | 22.34 |
| 0.91 | 0.06 | 1.06 | 10.78 | 120.67 | 4.14 | 140.58 | 25.48 |
| 1.06 | 0.07 | 1.24 | 10.85 | 140.58 | 6.42 | 163.77 | 32.50 |
| 1.24 | 0.08 | 1.44 | 10.93 | 163.77 | 8.93 | 190.80 | 41.82 |
| 1.44 | 0.09 | 1.68 | 11.03 | 190.80 | 10.98 | 222.28 | 52.79 |
| 1.68 | 0.11 | 1.95 | 11.14 | 222.28 | 12.29 | 258.95 | 65.08 |
| 1.95 | 0.13 | 2.28 | 11.20 | 258.95 | 11.46 | 301.68 | 78.54 |
| 2.28 | 0.14 | 2.66 | 11.41 | 301.68 | 9.63 | 351.46 | 88.17 |
| 2.66 | 0.17 | 3.09 | 11.57 | 351.46 | 7.20 | 409.45 | 93.37 |
| 3.09 | 0.19 | 3.60 | 11.77 | 409.45 | 4.61 | 477.01 | 97.68 |
| 3.60 | 0.22 | 4.19 | 11.99 | 477.01 | 2.02 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.25 | 4.88 | 12.24 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.28 | 5.69 | 12.52 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.30 | 6.63 | 12.82 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 ชั้น 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

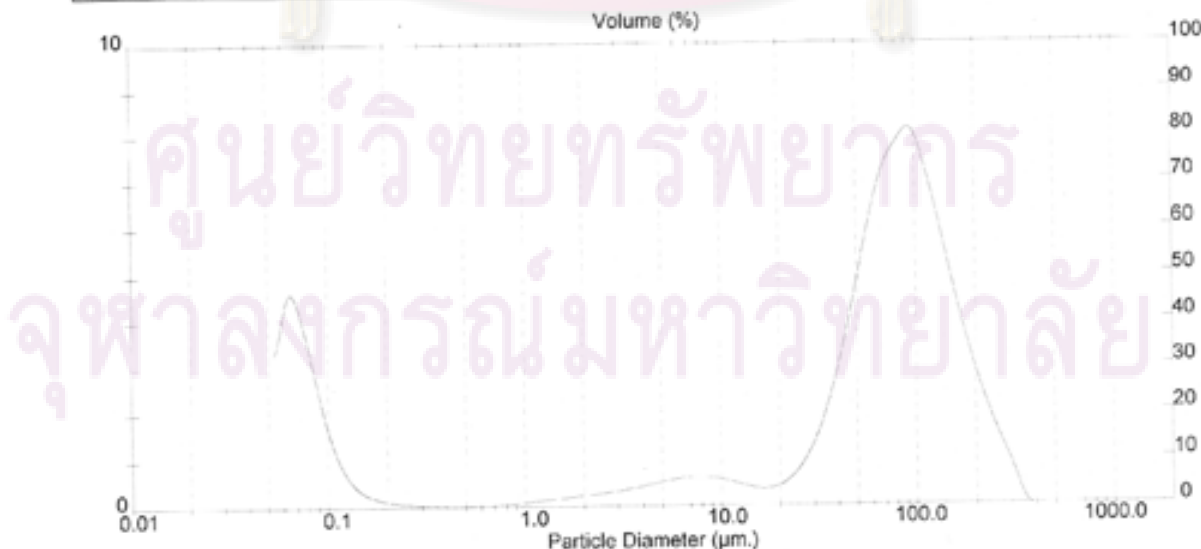
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.400 | Run Number: 3 | Measured: 26 Sep 2006 12:17PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 496 | Analysed: 26 Sep 2006 12:17PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300Rf mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 16.0 % |
| Presentation: 3CHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.481 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0167 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 15.5111 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 0.07 um | D (v, 0.5) = 67.82 um | D (v, 0.9) = 163.78 um |
| D [4, 3] = 75.68 um | D [3, 2] = 0.39 um | Span = 2.414E+03 | Uniformity = 7.576E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 3.26 | 0.06 | 3.26 | 0.05 | 0.61 | 7.72 | 23.38 |
| 0.06 | 4.53 | 0.07 | 7.78 | 0.06 | 0.61 | 9.00 | 24.00 |
| 0.07 | 4.12 | 0.08 | 11.91 | 0.07 | 0.58 | 10.48 | 24.57 |
| 0.08 | 2.92 | 0.09 | 14.83 | 0.08 | 0.51 | 12.21 | 25.09 |
| 0.09 | 1.73 | 0.11 | 16.56 | 0.09 | 0.44 | 14.22 | 25.52 |
| 0.11 | 0.92 | 0.13 | 17.49 | 0.11 | 0.37 | 16.57 | 25.90 |
| 0.13 | 0.48 | 0.15 | 17.97 | 0.13 | 0.37 | 19.31 | 26.27 |
| 0.15 | 0.26 | 0.17 | 18.23 | 0.15 | 0.46 | 22.49 | 26.73 |
| 0.17 | 0.16 | 0.20 | 18.39 | 0.17 | 0.70 | 26.20 | 27.43 |
| 0.20 | 0.10 | 0.23 | 18.50 | 0.20 | 1.11 | 30.53 | 28.53 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 18.57 | 0.23 | 1.74 | 35.56 | 30.27 |
| 0.27 | 0.05 | 0.31 | 18.62 | 0.27 | 2.64 | 41.43 | 32.92 |
| 0.31 | 0.04 | 0.35 | 18.65 | 0.31 | 3.83 | 48.27 | 36.75 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 18.68 | 0.36 | 5.18 | 56.23 | 41.93 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 18.71 | 0.42 | 6.46 | 65.51 | 48.39 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 18.73 | 0.49 | 7.38 | 76.32 | 55.77 |
| 0.58 | 0.03 | 0.67 | 18.76 | 0.58 | 7.86 | 88.91 | 63.63 |
| 0.67 | 0.03 | 0.78 | 18.79 | 0.67 | 8.07 | 103.58 | 71.70 |
| 0.78 | 0.06 | 0.91 | 18.85 | 0.78 | 7.27 | 120.67 | 78.97 |
| 0.91 | 0.09 | 1.06 | 18.93 | 0.91 | 6.15 | 140.58 | 85.12 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 19.05 | 1.06 | 4.88 | 163.77 | 90.00 |
| 1.24 | 0.15 | 1.44 | 19.20 | 1.24 | 3.71 | 190.80 | 93.71 |
| 1.44 | 0.17 | 1.68 | 19.37 | 1.44 | 2.70 | 222.28 | 96.41 |
| 1.68 | 0.21 | 1.95 | 19.58 | 1.68 | 1.86 | 258.95 | 98.29 |
| 1.95 | 0.24 | 2.28 | 19.82 | 1.95 | 1.20 | 301.88 | 99.49 |
| 2.28 | 0.27 | 2.65 | 20.10 | 2.28 | 0.51 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.31 | 3.09 | 20.41 | 2.65 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.36 | 3.60 | 20.77 | 3.09 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.41 | 4.19 | 21.18 | 3.60 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.47 | 4.88 | 21.66 | 4.19 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.53 | 5.69 | 22.19 | 4.88 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.58 | 6.63 | 22.77 | 5.69 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 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

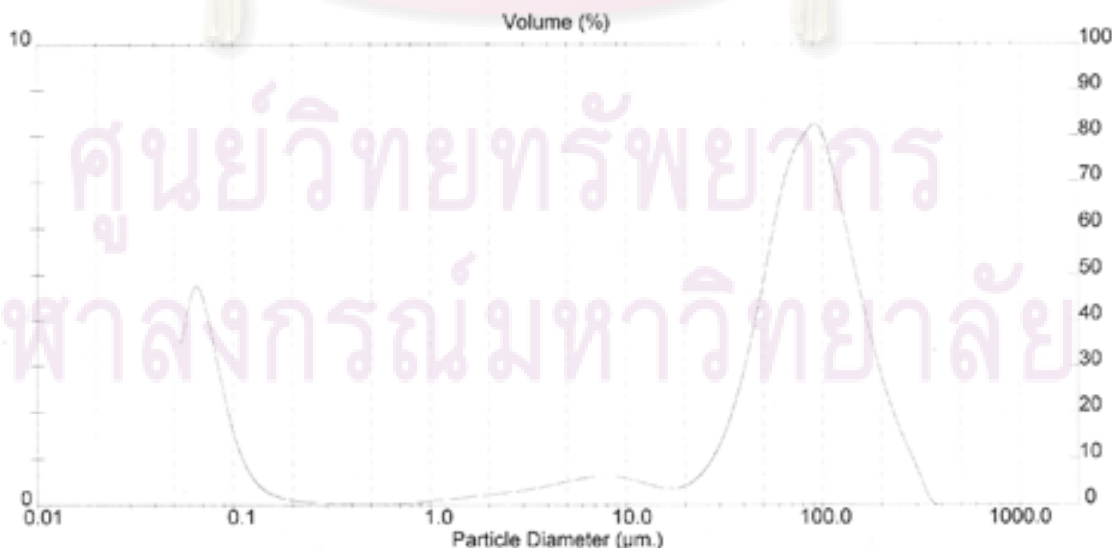
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.400 | Run Number: 6 | Measured: 26 Sep 2006 12:18PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 499 | Analysed: 26 Sep 2009 12:18PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| 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: 0.393 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0164 %/vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 15.8118 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.07 um | D [v, 0.5] = 67.49 um | D [v, 0.9] = 160.62 um |
| D [4, 3] = 74.62 um | D [3, 2] = 6.38 um | Span = 2.379E+00 | Uniformity = 7.490E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Uncert% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|---------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 3.47 | 0.08 | 3.47 | 6.63 | 0.62 | 7.72 | 23.58 |
| 0.06 | 4.71 | 0.07 | 8.18 | 7.72 | 0.62 | 9.00 | 24.20 |
| 0.07 | 4.18 | 0.08 | 12.36 | 9.00 | 0.59 | 10.48 | 24.79 |
| 0.08 | 2.87 | 0.09 | 15.23 | 10.48 | 0.53 | 12.21 | 25.32 |
| 0.09 | 1.65 | 0.11 | 16.88 | 12.21 | 0.45 | 14.22 | 25.76 |
| 0.11 | 0.60 | 0.13 | 17.73 | 14.22 | 0.38 | 16.57 | 26.14 |
| 0.13 | 0.44 | 0.15 | 18.17 | 16.57 | 0.37 | 19.31 | 26.51 |
| 0.15 | 0.24 | 0.17 | 18.41 | 19.31 | 0.45 | 22.49 | 26.96 |
| 0.17 | 0.15 | 0.20 | 18.58 | 22.49 | 0.58 | 26.20 | 27.64 |
| 0.20 | 0.10 | 0.23 | 18.68 | 26.20 | 1.07 | 30.53 | 28.71 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 18.72 | 30.53 | 1.59 | 35.56 | 30.40 |
| 0.27 | 0.05 | 0.31 | 18.77 | 35.56 | 2.59 | 41.43 | 33.00 |
| 0.31 | 0.04 | 0.36 | 18.81 | 41.43 | 3.81 | 46.27 | 36.80 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 18.84 | 46.27 | 5.21 | 56.23 | 42.01 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 18.87 | 56.23 | 6.57 | 65.51 | 48.58 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 18.89 | 65.51 | 7.54 | 76.32 | 56.13 |
| 0.58 | 0.03 | 0.67 | 18.92 | 76.32 | 8.02 | 88.91 | 64.15 |
| 0.67 | 0.04 | 0.78 | 18.95 | 88.91 | 8.19 | 103.88 | 72.33 |
| 0.78 | 0.06 | 0.91 | 19.01 | 103.88 | 7.30 | 120.67 | 79.63 |
| 0.91 | 0.09 | 1.06 | 19.10 | 120.67 | 6.11 | 140.58 | 85.74 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 19.22 | 140.58 | 4.80 | 163.77 | 90.54 |
| 1.24 | 0.15 | 1.44 | 19.37 | 163.77 | 3.60 | 190.80 | 94.14 |
| 1.44 | 0.18 | 1.68 | 19.55 | 190.80 | 2.58 | 222.28 | 95.72 |
| 1.68 | 0.21 | 1.95 | 19.76 | 222.28 | 1.75 | 258.95 | 98.47 |
| 1.95 | 0.24 | 2.28 | 20.01 | 258.95 | 1.09 | 301.68 | 99.56 |
| 2.28 | 0.27 | 2.65 | 20.28 | 301.68 | 0.44 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.31 | 3.09 | 20.59 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.35 | 3.60 | 20.95 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.41 | 4.19 | 21.37 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.47 | 4.88 | 21.84 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.53 | 5.69 | 22.37 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.59 | 6.63 | 22.96 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ชั้น 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

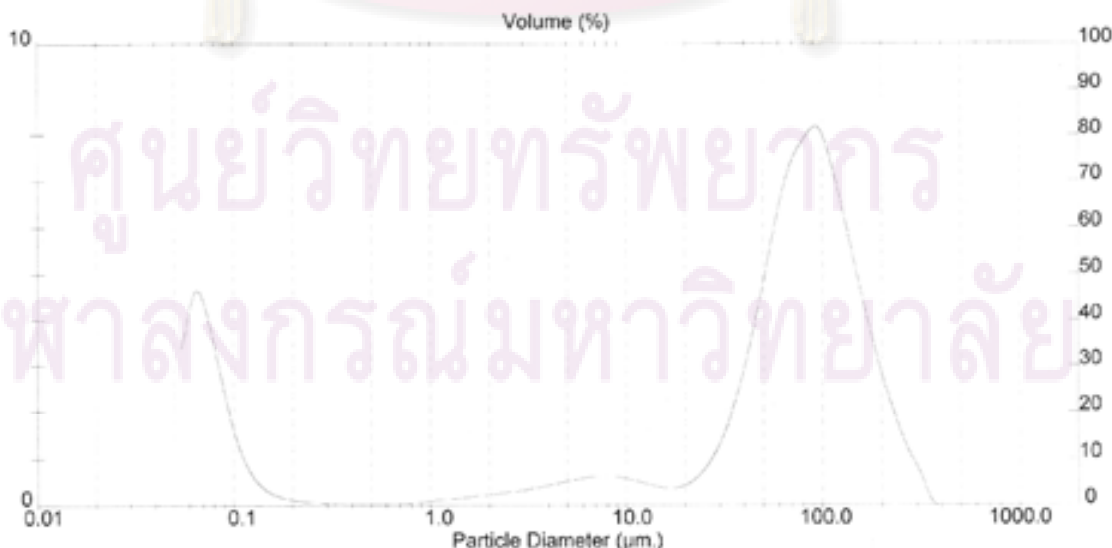
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) No.400 | Run Number: 9 | Measured: 26 Sep 2006 12:18PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 502 | Analysed: 26 Sep 2006 12:18PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 16.4 % |
| Presentation: 3DHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.414 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0161 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 15.5844 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.07 um | D [v, 0.5] = 67.51 um | D [v, 0.9] = 161.70 um |
| D [4, 3] = 74.96 um | D [3, 2] = 0.39 um | Span = 2.394E+00 | Uniformity = 7.538E-01 |

| Size, Low (um) | In % | Size, High (um) | Under% | Size, Low (um) | In % | Size, High (um) | Under% |
|----------------|------|-----------------|--------|----------------|------|-----------------|--------|
| 0.05 | 3.33 | 0.08 | 3.33 | 6.03 | 0.62 | 7.72 | 23.50 |
| 0.06 | 4.58 | 0.07 | 7.91 | 7.72 | 0.62 | 9.00 | 24.12 |
| 0.07 | 4.13 | 0.08 | 12.04 | 9.00 | 0.59 | 10.48 | 24.71 |
| 0.08 | 2.89 | 0.09 | 14.63 | 10.48 | 0.53 | 12.21 | 25.24 |
| 0.09 | 1.69 | 0.11 | 16.63 | 12.21 | 0.45 | 14.22 | 25.68 |
| 0.11 | 0.90 | 0.13 | 17.52 | 14.22 | 0.38 | 16.57 | 26.07 |
| 0.13 | 0.47 | 0.15 | 17.99 | 16.57 | 0.38 | 19.31 | 26.45 |
| 0.15 | 0.26 | 0.17 | 18.25 | 19.31 | 0.47 | 22.49 | 26.92 |
| 0.17 | 0.15 | 0.20 | 18.40 | 22.49 | 0.70 | 26.20 | 27.01 |
| 0.20 | 0.10 | 0.23 | 18.50 | 26.20 | 1.10 | 30.53 | 28.71 |
| 0.23 | 0.07 | 0.27 | 18.57 | 30.53 | 1.72 | 35.56 | 30.43 |
| 0.27 | 0.05 | 0.31 | 18.63 | 35.56 | 2.62 | 41.43 | 33.06 |
| 0.31 | 0.04 | 0.36 | 18.66 | 41.43 | 3.82 | 48.27 | 36.88 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 18.70 | 48.27 | 5.19 | 56.23 | 42.07 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 18.72 | 56.23 | 6.52 | 65.51 | 48.59 |
| 0.49 | 0.03 | 0.58 | 18.75 | 65.51 | 7.46 | 76.32 | 56.04 |
| 0.58 | 0.03 | 0.67 | 18.78 | 76.32 | 7.93 | 88.91 | 63.98 |
| 0.67 | 0.04 | 0.78 | 18.81 | 88.91 | 8.12 | 103.58 | 72.10 |
| 0.78 | 0.06 | 0.91 | 18.87 | 103.58 | 7.28 | 120.67 | 79.38 |
| 0.91 | 0.09 | 1.06 | 18.96 | 120.67 | 6.13 | 140.58 | 85.51 |
| 1.06 | 0.12 | 1.24 | 19.09 | 140.58 | 4.85 | 163.77 | 90.36 |
| 1.24 | 0.15 | 1.44 | 19.24 | 163.77 | 3.66 | 190.80 | 94.02 |
| 1.44 | 0.18 | 1.68 | 19.42 | 190.80 | 2.52 | 222.28 | 96.64 |
| 1.68 | 0.22 | 1.95 | 19.64 | 222.28 | 1.77 | 258.95 | 98.41 |
| 1.95 | 0.25 | 2.28 | 19.89 | 258.95 | 1.07 | 301.68 | 99.48 |
| 2.28 | 0.28 | 2.65 | 20.17 | 301.68 | 0.52 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.32 | 3.09 | 20.49 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.37 | 3.60 | 20.85 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 0.42 | 4.19 | 21.27 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 0.48 | 4.88 | 21.75 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 0.54 | 5.69 | 22.29 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 0.59 | 6.63 | 22.88 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





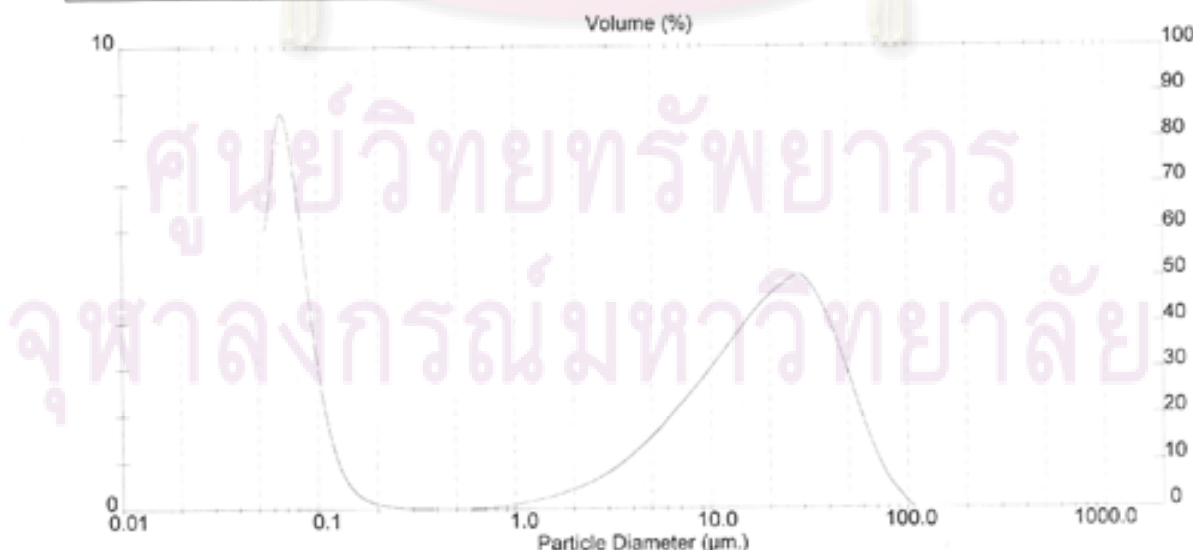
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) Pan | Run Number: 14 | Measured: 26 Sep 2006 11:07PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 458 | Analysed: 26 Sep 2006 11:07PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 17.6 % |
| Presentation: 3CHD | [Particle R.I. = (1.6295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.764 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0093 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 28.4457 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.09 um | D [v, 0.5] = 9.85 um | D [v, 0.9] = 41.30 um |
| D [4, 3] = 15.64 um | D [3, 2] = 0.21 um | Span = 4.185E+00 | Uniformity = 1.362E+00 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 5.95 | 0.06 | 5.96 | 0.63 | 2.24 | 7.72 | 45.74 |
| 0.06 | 8.39 | 0.07 | 14.34 | 7.72 | 2.57 | 9.00 | 48.30 |
| 0.07 | 7.73 | 0.08 | 22.07 | 9.00 | 2.92 | 10.48 | 51.22 |
| 0.08 | 5.45 | 0.09 | 27.53 | 10.48 | 3.28 | 12.21 | 54.50 |
| 0.09 | 3.15 | 0.11 | 30.69 | 12.21 | 3.66 | 14.22 | 56.17 |
| 0.11 | 1.58 | 0.13 | 32.27 | 14.22 | 4.03 | 16.57 | 62.20 |
| 0.13 | 0.74 | 0.15 | 33.01 | 16.57 | 4.37 | 19.31 | 66.57 |
| 0.15 | 0.35 | 0.17 | 33.35 | 19.31 | 4.85 | 22.49 | 71.23 |
| 0.17 | 0.17 | 0.20 | 33.52 | 22.49 | 4.86 | 26.20 | 76.09 |
| 0.20 | 0.09 | 0.23 | 33.61 | 26.20 | 5.02 | 30.53 | 81.10 |
| 0.23 | 0.05 | 0.27 | 33.65 | 30.53 | 4.75 | 35.56 | 85.85 |
| 0.27 | 0.03 | 0.31 | 33.68 | 35.56 | 4.23 | 41.43 | 90.68 |
| 0.31 | 0.02 | 0.36 | 33.70 | 41.43 | 3.50 | 46.27 | 93.58 |
| 0.36 | 0.01 | 0.42 | 33.71 | 46.27 | 2.67 | 56.23 | 96.25 |
| 0.42 | 0.01 | 0.49 | 33.71 | 56.23 | 1.83 | 65.51 | 98.09 |
| 0.49 | 0.01 | 0.56 | 33.72 | 65.51 | 1.11 | 76.32 | 99.20 |
| 0.56 | 0.01 | 0.67 | 33.74 | 76.32 | 0.57 | 85.51 | 99.76 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 33.76 | 85.51 | 0.24 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.05 | 0.91 | 33.81 | 103.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.09 | 1.06 | 33.90 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.14 | 1.24 | 34.04 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.20 | 1.44 | 34.24 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.27 | 1.68 | 34.51 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.36 | 1.95 | 34.87 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.45 | 2.28 | 35.32 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.57 | 2.65 | 35.89 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.71 | 3.09 | 36.60 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.89 | 3.60 | 37.50 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 1.11 | 4.19 | 38.60 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.35 | 4.98 | 39.95 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.98 | 1.62 | 5.99 | 41.58 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.99 | 1.92 | 6.63 | 43.50 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





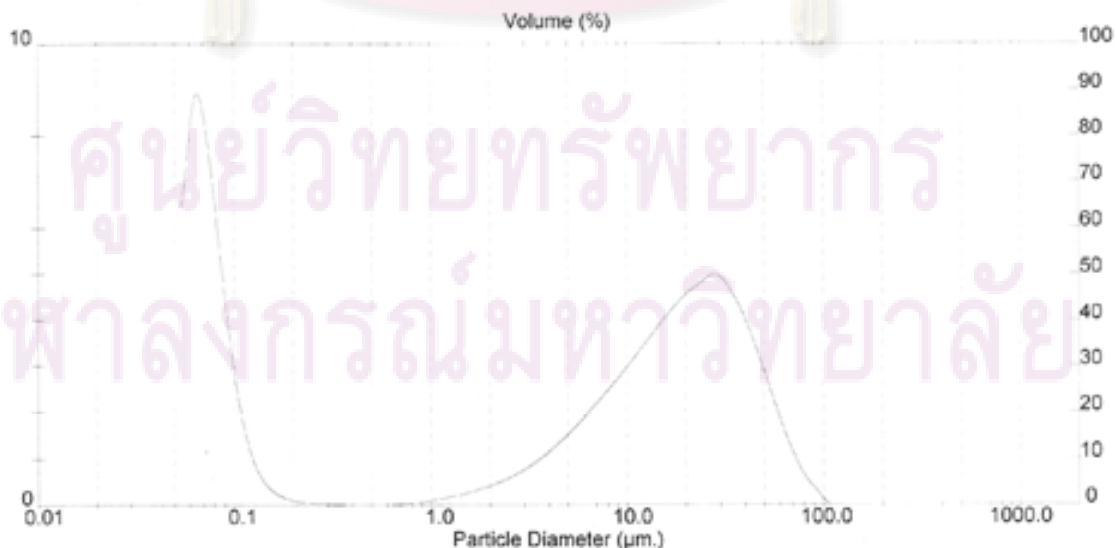
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) Pan | Run Number: 15 | Measured: 26 Sep 2009 11:09PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 469 | Analysed: 26 Sep 2009 11:08PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 17.6 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.795 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0093 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 26.2238 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.06 um | D [v, 0.5] = 9.66 um | D [v, 0.9] = 41.28 um |
| D [4, 3] = 15.55 um | D [3, 2] = 0.21 um | Span = 4.268E+00 | Uniformity = 1.421E+00 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 6.37 | 0.06 | 6.38 | 6.63 | 2.21 | 7.72 | 46.16 |
| 0.06 | 8.81 | 0.07 | 15.18 | 7.72 | 2.54 | 9.00 | 46.70 |
| 0.07 | 7.51 | 0.08 | 23.09 | 9.00 | 2.88 | 10.48 | 51.58 |
| 0.08 | 5.42 | 0.09 | 28.51 | 10.48 | 3.25 | 12.21 | 54.83 |
| 0.09 | 3.02 | 0.11 | 31.53 | 12.21 | 3.62 | 14.22 | 58.45 |
| 0.11 | 1.40 | 0.13 | 32.99 | 14.22 | 3.99 | 16.57 | 62.44 |
| 0.13 | 0.67 | 0.15 | 33.66 | 16.57 | 4.33 | 19.31 | 66.77 |
| 0.15 | 0.31 | 0.17 | 33.97 | 19.31 | 4.61 | 22.49 | 71.38 |
| 0.17 | 0.16 | 0.20 | 34.11 | 22.49 | 4.82 | 26.20 | 76.20 |
| 0.20 | 0.08 | 0.23 | 34.19 | 26.20 | 4.98 | 30.53 | 81.18 |
| 0.23 | 0.04 | 0.27 | 34.23 | 30.53 | 4.71 | 35.56 | 85.89 |
| 0.27 | 0.02 | 0.31 | 34.25 | 35.56 | 4.20 | 41.43 | 90.09 |
| 0.31 | 0.01 | 0.36 | 34.27 | 41.43 | 3.49 | 48.27 | 93.58 |
| 0.36 | 0.01 | 0.42 | 34.28 | 48.27 | 2.66 | 56.23 | 96.24 |
| 0.42 | 0.01 | 0.49 | 34.28 | 56.23 | 1.84 | 65.51 | 98.07 |
| 0.49 | 0.01 | 0.58 | 34.29 | 65.51 | 1.11 | 76.32 | 99.19 |
| 0.58 | 0.01 | 0.67 | 34.30 | 76.32 | 0.57 | 88.91 | 99.76 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 34.32 | 88.91 | 0.24 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.05 | 0.91 | 34.37 | 103.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.09 | 1.06 | 34.46 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.14 | 1.24 | 34.60 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.20 | 1.44 | 34.79 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.26 | 1.68 | 35.06 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.35 | 1.95 | 35.41 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.45 | 2.28 | 35.86 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.56 | 2.65 | 36.42 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.71 | 3.09 | 37.13 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.88 | 3.60 | 38.01 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 1.00 | 4.10 | 39.11 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.10 | 1.34 | 4.88 | 40.44 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.61 | 5.69 | 42.05 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.90 | 6.63 | 43.95 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฝ่ายกองเครื่องมือวิทยาศาสตร์
 อาคารสถาบัน 2 ชั้น 62 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2640211
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Sol 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2640211

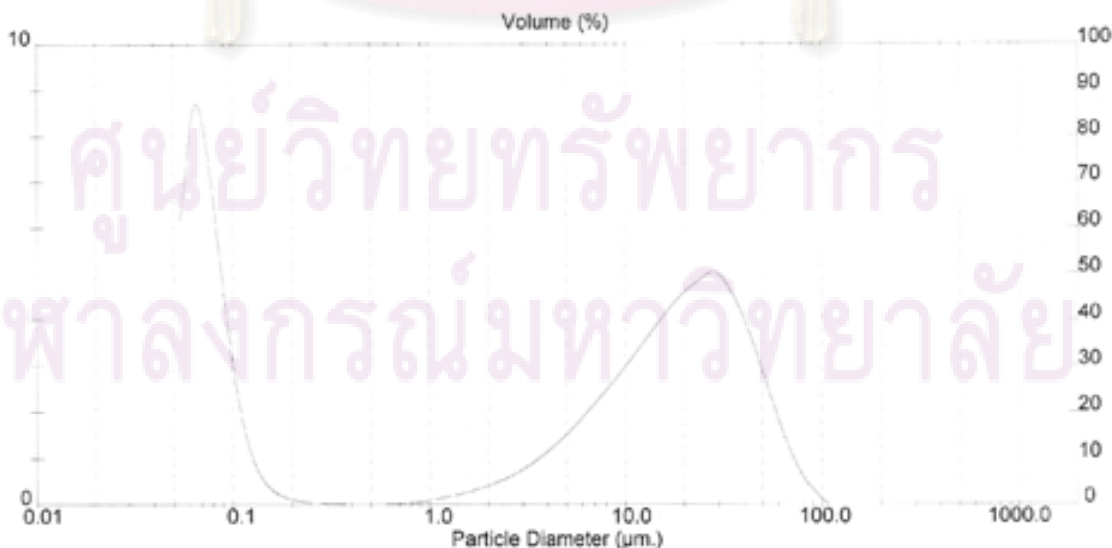
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (H2SO4) Pan | Run Number: 17 | Measured: 26 Sep 2006 11:08PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 490 | Analysed: 26 Sep 2006 11:08PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium - Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 17.7 % |
| Presentation: 3DHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000): | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.828 % |
| Analysis Modal: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0093 %Vol | Density = 1,000 g / cub. cm | Specific S.A. = 28.8588 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.06 um | D [v, 0.5] = 9.70 um | D [v, 0.9] = 40.96 um |
| D [4, 3] = 15.47 um | D [3, 2] = 0.21 um | Span = 4.218E+00 | Uniformity = 1.404E+00 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 6.08 | 0.08 | 6.08 | 6.63 | 2.22 | 7.72 | 46.08 |
| 0.06 | 8.54 | 0.07 | 14.62 | 7.72 | 2.55 | 9.00 | 48.62 |
| 0.07 | 7.84 | 0.08 | 22.46 | 9.00 | 2.90 | 10.48 | 51.52 |
| 0.08 | 5.52 | 0.09 | 27.98 | 10.48 | 3.27 | 12.21 | 54.79 |
| 0.09 | 3.17 | 0.11 | 31.15 | 12.21 | 3.65 | 14.22 | 58.44 |
| 0.11 | 1.58 | 0.13 | 32.72 | 14.22 | 4.03 | 16.57 | 62.47 |
| 0.13 | 0.73 | 0.15 | 33.46 | 16.57 | 4.37 | 19.31 | 66.84 |
| 0.15 | 0.34 | 0.17 | 33.80 | 19.31 | 4.65 | 22.49 | 71.49 |
| 0.17 | 0.17 | 0.20 | 33.66 | 22.49 | 4.86 | 26.20 | 76.34 |
| 0.20 | 0.08 | 0.23 | 34.05 | 26.20 | 5.01 | 30.53 | 81.35 |
| 0.23 | 0.05 | 0.27 | 34.09 | 30.53 | 4.74 | 35.55 | 86.09 |
| 0.27 | 0.03 | 0.31 | 34.12 | 35.56 | 4.21 | 41.43 | 90.29 |
| 0.31 | 0.02 | 0.36 | 34.13 | 41.43 | 3.47 | 48.27 | 93.76 |
| 0.36 | 0.01 | 0.42 | 34.14 | 48.27 | 2.63 | 56.23 | 96.40 |
| 0.42 | 0.01 | 0.49 | 34.15 | 56.23 | 1.80 | 65.51 | 98.19 |
| 0.49 | 0.01 | 0.58 | 34.16 | 65.51 | 1.07 | 76.32 | 99.26 |
| 0.58 | 0.01 | 0.67 | 34.17 | 76.32 | 0.53 | 88.91 | 99.80 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 34.19 | 88.91 | 0.20 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.05 | 0.91 | 34.24 | 103.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.09 | 1.06 | 34.33 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.14 | 1.24 | 34.47 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.20 | 1.44 | 34.67 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.27 | 1.68 | 34.94 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.35 | 1.95 | 35.29 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.45 | 2.28 | 35.74 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.57 | 2.65 | 36.31 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.71 | 3.09 | 37.02 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 0.89 | 3.60 | 37.91 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 1.10 | 4.19 | 39.00 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.34 | 4.88 | 40.34 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.61 | 5.69 | 41.95 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.91 | 6.63 | 43.86 | 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

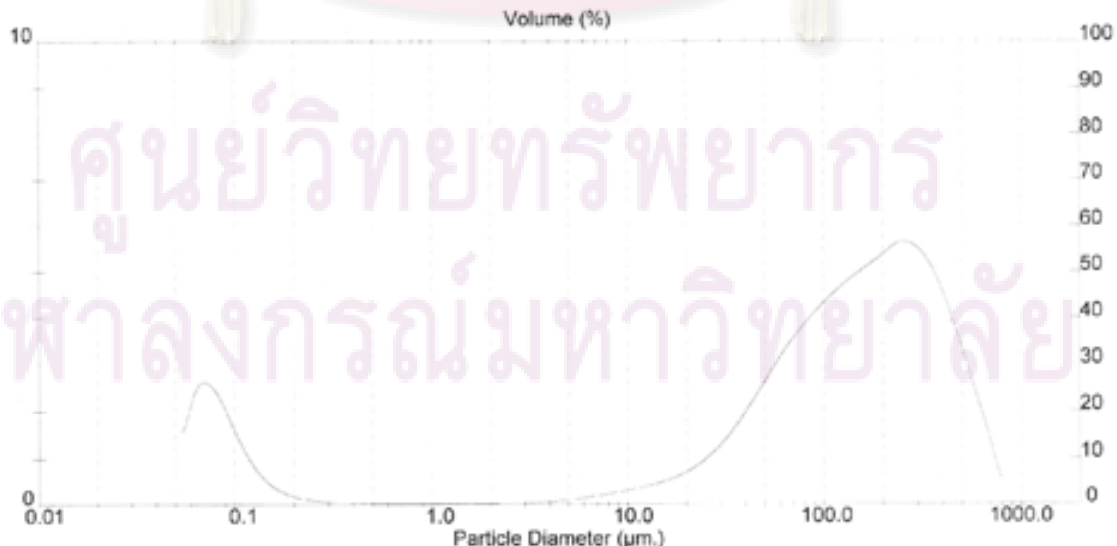
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (Power Station) | Run Number: 6 | Measured: 26 Sep 2006 15:50PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 574 | Analysed: 26 Sep 2006 15:50PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 30CRF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: M51 | Obscuration: 21.2 % |
| Presentation: 3OHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.260 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0326 %/Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 9.9288 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.10 um | D [v, 0.5] = 132.75 um | D [v, 0.9] = 429.05 um |
| D [4, 3] = 181.31 um | D [3, 2] = 0.60 um | Span = 3.231E+00 | Uniformity = 9.842E-01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.54 | 0.06 | 1.55 | 6.63 | 0.19 | 7.72 | 14.02 |
| 0.06 | 2.42 | 0.07 | 3.97 | 7.72 | 0.24 | 9.00 | 14.26 |
| 0.07 | 2.59 | 0.08 | 6.55 | 9.00 | 0.29 | 10.48 | 14.56 |
| 0.08 | 2.22 | 0.09 | 8.78 | 10.48 | 0.35 | 12.21 | 14.91 |
| 0.09 | 1.63 | 0.11 | 10.41 | 12.21 | 0.42 | 14.22 | 15.33 |
| 0.11 | 1.06 | 0.13 | 11.47 | 14.22 | 0.50 | 16.57 | 15.82 |
| 0.13 | 0.65 | 0.15 | 12.12 | 16.57 | 0.60 | 19.31 | 16.42 |
| 0.15 | 0.39 | 0.17 | 12.51 | 19.31 | 0.74 | 22.49 | 17.16 |
| 0.17 | 0.24 | 0.20 | 12.75 | 22.49 | 0.93 | 26.20 | 18.09 |
| 0.20 | 0.14 | 0.23 | 12.89 | 26.20 | 1.17 | 30.53 | 19.26 |
| 0.23 | 0.09 | 0.27 | 12.98 | 30.53 | 1.48 | 35.56 | 20.75 |
| 0.27 | 0.06 | 0.31 | 13.04 | 35.56 | 1.86 | 41.43 | 22.61 |
| 0.31 | 0.04 | 0.36 | 13.08 | 41.43 | 2.29 | 48.27 | 24.89 |
| 0.36 | 0.03 | 0.42 | 13.12 | 48.27 | 2.74 | 56.23 | 27.64 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 13.14 | 56.23 | 3.18 | 65.51 | 30.82 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 13.16 | 65.51 | 3.58 | 76.32 | 34.39 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 13.18 | 76.32 | 3.92 | 88.91 | 38.31 |
| 0.67 | 0.01 | 0.78 | 13.19 | 88.91 | 4.23 | 103.58 | 42.54 |
| 0.78 | 0.02 | 0.91 | 13.21 | 103.58 | 4.51 | 120.67 | 47.05 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 13.23 | 120.67 | 4.76 | 140.58 | 51.81 |
| 1.06 | 0.02 | 1.24 | 13.24 | 140.58 | 4.97 | 163.77 | 56.78 |
| 1.24 | 0.02 | 1.44 | 13.26 | 163.77 | 5.18 | 190.80 | 61.97 |
| 1.44 | 0.02 | 1.68 | 13.28 | 190.80 | 5.40 | 222.28 | 67.37 |
| 1.68 | 0.02 | 1.95 | 13.31 | 222.28 | 5.61 | 258.95 | 72.98 |
| 1.95 | 0.02 | 2.28 | 13.33 | 258.95 | 5.58 | 301.68 | 78.95 |
| 2.28 | 0.03 | 2.65 | 13.35 | 301.68 | 5.32 | 351.46 | 83.88 |
| 2.65 | 0.03 | 3.09 | 13.39 | 351.46 | 4.80 | 409.45 | 88.67 |
| 3.09 | 0.04 | 3.60 | 13.43 | 409.45 | 4.05 | 477.01 | 92.73 |
| 3.60 | 0.06 | 4.19 | 13.48 | 477.01 | 3.18 | 555.71 | 95.90 |
| 4.19 | 0.08 | 4.85 | 13.56 | 555.71 | 2.27 | 647.41 | 98.18 |
| 4.85 | 0.11 | 5.69 | 13.68 | 647.41 | 1.37 | 754.23 | 99.54 |
| 5.69 | 0.15 | 6.63 | 13.83 | 754.23 | 0.46 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฝ่ายการณมหาวิทยาลัย
 อาคารตึก 2 จุฬาลงกรณ์ ๖๒ อ.ตลิ่งใต้ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32 2188101 โทรสาร 21402111
 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

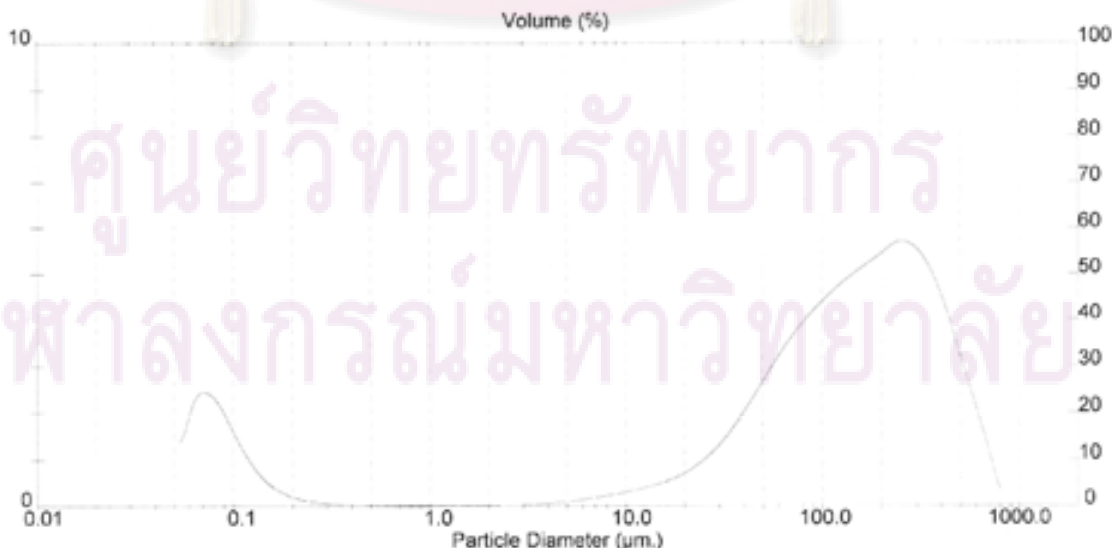
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (Power Station) | Run Number: 7 | Measured: 26 Sep 2006 15:50PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 575 | Analysed: 26 Sep 2006 15:50PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 21.2 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000)] | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.378 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0332 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 9.4540 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.11 um | D [v, 0.5] = 131.62 um | D [v, 0.9] = 418.79 um |
| D [4, 3] = 178.12 um | D [3, 2] = 0.63 um | Span = 3.181E+00 | Uniformity = 9.672E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.37 | 0.05 | 1.37 | 6.63 | 0.19 | 7.72 | 13.66 |
| 0.06 | 2.20 | 0.07 | 3.58 | 7.72 | 0.24 | 9.00 | 13.92 |
| 0.07 | 2.42 | 0.08 | 6.00 | 9.00 | 0.30 | 10.48 | 14.22 |
| 0.08 | 2.16 | 0.09 | 8.16 | 10.48 | 0.36 | 12.21 | 14.58 |
| 0.09 | 1.64 | 0.11 | 9.80 | 12.21 | 0.42 | 14.22 | 15.00 |
| 0.11 | 1.12 | 0.13 | 10.92 | 14.22 | 0.51 | 16.57 | 15.51 |
| 0.13 | 0.71 | 0.15 | 11.63 | 16.57 | 0.61 | 19.31 | 16.12 |
| 0.15 | 0.44 | 0.17 | 12.09 | 19.31 | 0.76 | 22.49 | 16.88 |
| 0.17 | 0.27 | 0.20 | 12.33 | 22.49 | 0.95 | 26.20 | 17.82 |
| 0.20 | 0.17 | 0.23 | 12.60 | 26.20 | 1.20 | 30.53 | 19.02 |
| 0.23 | 0.10 | 0.27 | 12.60 | 30.53 | 1.52 | 35.56 | 20.54 |
| 0.27 | 0.07 | 0.31 | 12.67 | 35.56 | 1.90 | 41.43 | 22.44 |
| 0.31 | 0.05 | 0.36 | 12.72 | 41.43 | 2.33 | 48.27 | 24.77 |
| 0.36 | 0.04 | 0.42 | 12.76 | 48.27 | 2.78 | 56.23 | 27.55 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 12.79 | 56.23 | 3.23 | 65.51 | 30.78 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 12.81 | 65.51 | 3.63 | 76.32 | 34.41 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 12.83 | 76.32 | 3.99 | 88.91 | 38.40 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 12.85 | 88.91 | 4.30 | 103.68 | 42.70 |
| 0.78 | 0.02 | 0.91 | 12.86 | 103.68 | 4.58 | 120.67 | 47.28 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 12.88 | 120.67 | 4.83 | 140.68 | 52.11 |
| 1.06 | 0.02 | 1.24 | 12.90 | 140.68 | 5.05 | 163.77 | 57.16 |
| 1.24 | 0.02 | 1.44 | 12.92 | 163.77 | 5.26 | 190.80 | 62.42 |
| 1.44 | 0.02 | 1.68 | 12.94 | 190.80 | 5.47 | 222.28 | 67.89 |
| 1.68 | 0.02 | 1.95 | 12.96 | 222.28 | 5.68 | 258.95 | 73.50 |
| 1.95 | 0.02 | 2.28 | 12.98 | 258.95 | 5.84 | 301.68 | 79.20 |
| 2.28 | 0.03 | 2.65 | 13.01 | 301.68 | 6.38 | 351.46 | 84.56 |
| 2.65 | 0.03 | 3.09 | 13.04 | 351.46 | 4.80 | 409.45 | 89.36 |
| 3.09 | 0.04 | 3.60 | 13.08 | 409.45 | 3.99 | 477.01 | 93.35 |
| 3.60 | 0.06 | 4.19 | 13.14 | 477.01 | 3.06 | 555.71 | 96.41 |
| 4.19 | 0.08 | 4.88 | 13.22 | 555.71 | 2.13 | 647.41 | 98.54 |
| 4.88 | 0.11 | 5.69 | 13.33 | 647.41 | 1.20 | 754.23 | 99.73 |
| 5.69 | 0.15 | 6.63 | 13.48 | 754.23 | 0.27 | 878.67 | 100.00 |





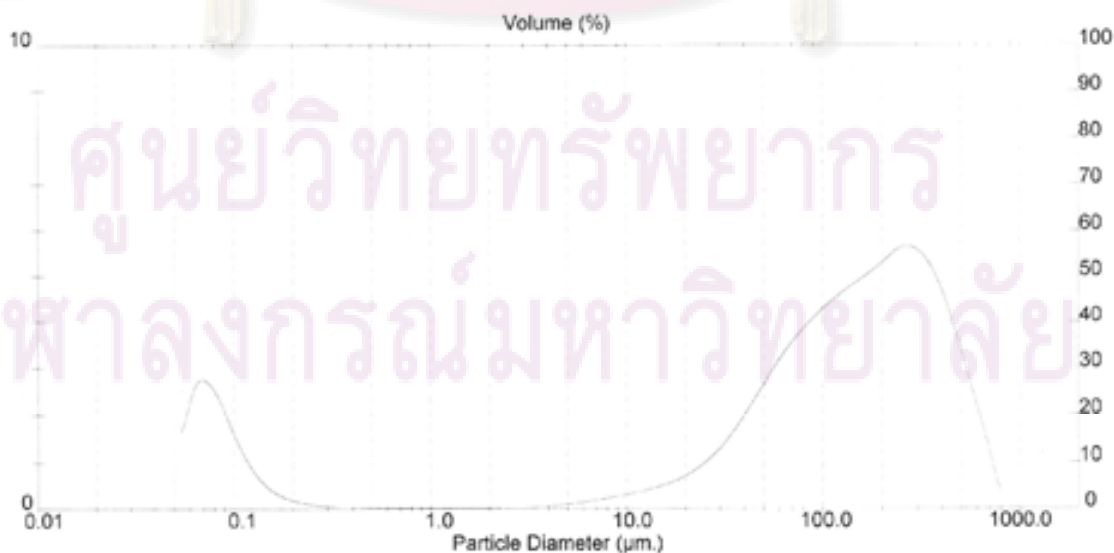
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: Ash (Power Station) | Run Number: 13 | Measured: 26 Sep 2006 15:51PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 581 | Analysed: 26 Sep 2006 15:51PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : no | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: M51 | Obscuration: 21.1 % |
| Presentation: 3CHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.292 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0317 %/Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 10.2582 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 0.10 um | D (v, 0.5) = 131.41 um | D (v, 0.9) = 424.59 um |
| D [4, 3] = 179.24 um | D [3, 2] = 6.58 um | Span = 3.230E+00 | Uniformity = 9.855E-01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 1.63 | 0.06 | 1.04 | 6.63 | 0.19 | 7.72 | 14.40 |
| 0.06 | 2.54 | 0.07 | 4.17 | 7.72 | 0.24 | 9.00 | 14.84 |
| 0.07 | 2.68 | 0.08 | 6.86 | 9.00 | 0.30 | 10.48 | 14.94 |
| 0.08 | 2.28 | 0.09 | 9.15 | 10.48 | 0.36 | 12.21 | 15.20 |
| 0.09 | 1.84 | 0.11 | 10.78 | 12.21 | 0.42 | 14.22 | 15.71 |
| 0.11 | 1.08 | 0.13 | 11.83 | 14.22 | 0.50 | 16.57 | 16.22 |
| 0.13 | 0.64 | 0.15 | 12.48 | 16.57 | 0.61 | 19.31 | 16.83 |
| 0.15 | 0.38 | 0.17 | 12.88 | 19.31 | 0.75 | 22.49 | 17.57 |
| 0.17 | 0.23 | 0.20 | 13.09 | 22.49 | 0.93 | 26.20 | 18.51 |
| 0.20 | 0.14 | 0.23 | 13.24 | 26.20 | 1.18 | 30.53 | 19.69 |
| 0.23 | 0.09 | 0.27 | 13.33 | 30.53 | 1.49 | 35.56 | 21.18 |
| 0.27 | 0.06 | 0.31 | 13.39 | 35.56 | 1.87 | 41.43 | 23.04 |
| 0.31 | 0.04 | 0.36 | 13.43 | 41.43 | 2.30 | 48.27 | 25.34 |
| 0.36 | 0.04 | 0.42 | 13.47 | 48.27 | 2.75 | 56.23 | 28.09 |
| 0.42 | 0.03 | 0.49 | 13.50 | 56.23 | 3.19 | 65.51 | 31.28 |
| 0.49 | 0.02 | 0.58 | 13.52 | 65.51 | 3.57 | 76.32 | 34.85 |
| 0.58 | 0.02 | 0.67 | 13.54 | 76.32 | 3.90 | 88.91 | 38.76 |
| 0.67 | 0.02 | 0.78 | 13.56 | 88.91 | 4.20 | 103.58 | 42.96 |
| 0.78 | 0.02 | 0.91 | 13.58 | 103.58 | 4.45 | 120.67 | 47.41 |
| 0.91 | 0.02 | 1.06 | 13.60 | 120.67 | 4.68 | 140.58 | 52.09 |
| 1.06 | 0.02 | 1.24 | 13.62 | 140.58 | 4.88 | 163.77 | 56.88 |
| 1.24 | 0.02 | 1.44 | 13.64 | 163.77 | 5.10 | 190.80 | 62.07 |
| 1.44 | 0.02 | 1.68 | 13.66 | 190.80 | 5.33 | 222.28 | 67.40 |
| 1.68 | 0.02 | 1.95 | 13.69 | 222.28 | 5.57 | 258.95 | 72.97 |
| 1.95 | 0.02 | 2.28 | 13.71 | 258.95 | 5.82 | 301.68 | 78.59 |
| 2.28 | 0.02 | 2.65 | 13.73 | 301.68 | 6.02 | 351.46 | 84.01 |
| 2.65 | 0.03 | 3.09 | 13.76 | 351.46 | 6.23 | 409.45 | 88.94 |
| 3.09 | 0.04 | 3.60 | 13.80 | 409.45 | 6.44 | 477.01 | 93.08 |
| 3.60 | 0.06 | 4.19 | 13.86 | 477.01 | 6.62 | 555.71 | 96.28 |
| 4.19 | 0.08 | 4.88 | 13.94 | 555.71 | 6.77 | 647.41 | 98.49 |
| 4.88 | 0.11 | 5.69 | 14.05 | 647.41 | 6.89 | 754.23 | 99.74 |
| 5.69 | 0.15 | 6.63 | 14.20 | 754.23 | 6.98 | 878.67 | 100.00 |





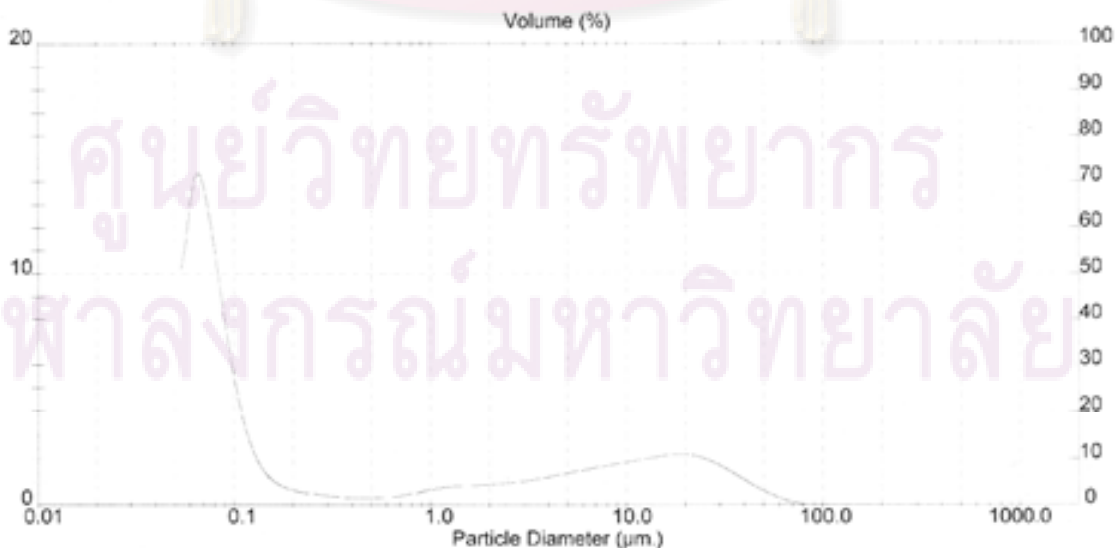
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: SiO2 (Quartz) | Run Number: 11 | Measured: 25 Sep 2006 16:26PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 399 | Analysed: 25 Sep 2006 16:26PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : 100% 4 min | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 15.9 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.493 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0048 %/vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 49.5059 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.06 um | D [v, 0.5] = 0.10 um | D [v, 0.9] = 19.98 um |
| D [4, 3] = 5.46 um | D [3, 2] = 0.12 um | Span = 1.993E+02 | Uniformity = 5.393E+01 |

| Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|-------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 10.08 | 0.06 | 10.08 | 6.63 | 1.62 | 7.72 | 77.74 |
| 0.06 | 14.09 | 0.07 | 24.17 | 7.72 | 1.72 | 9.00 | 79.46 |
| 0.07 | 13.00 | 0.08 | 37.16 | 9.00 | 1.82 | 10.48 | 81.28 |
| 0.08 | 9.38 | 0.09 | 46.55 | 10.48 | 1.92 | 12.21 | 83.20 |
| 0.09 | 5.72 | 0.11 | 52.26 | 12.21 | 2.02 | 14.22 | 85.22 |
| 0.11 | 3.19 | 0.13 | 55.45 | 14.22 | 2.10 | 16.67 | 87.32 |
| 0.13 | 1.78 | 0.15 | 57.23 | 16.67 | 2.19 | 19.31 | 89.51 |
| 0.15 | 1.08 | 0.17 | 58.31 | 19.31 | 2.16 | 22.49 | 91.66 |
| 0.17 | 0.74 | 0.20 | 59.05 | 22.49 | 2.03 | 26.20 | 93.70 |
| 0.20 | 0.58 | 0.23 | 59.63 | 26.20 | 1.81 | 30.53 | 95.51 |
| 0.23 | 0.48 | 0.27 | 60.11 | 30.53 | 1.51 | 35.56 | 97.02 |
| 0.27 | 0.41 | 0.31 | 60.52 | 35.56 | 1.17 | 41.43 | 98.20 |
| 0.31 | 0.34 | 0.36 | 60.87 | 41.43 | 0.84 | 48.27 | 99.03 |
| 0.36 | 0.30 | 0.42 | 61.17 | 48.27 | 0.54 | 56.23 | 99.57 |
| 0.42 | 0.29 | 0.49 | 61.45 | 56.23 | 0.30 | 65.51 | 99.87 |
| 0.49 | 0.30 | 0.58 | 61.76 | 65.51 | 0.13 | 76.32 | 100.00 |
| 0.58 | 0.33 | 0.67 | 62.09 | 76.32 | 0.00 | 89.91 | 100.00 |
| 0.67 | 0.40 | 0.78 | 62.49 | 89.91 | 0.00 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.50 | 0.91 | 62.99 | 103.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.63 | 1.06 | 63.62 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.74 | 1.24 | 64.36 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.79 | 1.44 | 65.15 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.82 | 1.68 | 65.97 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.86 | 1.95 | 66.83 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.89 | 2.28 | 67.72 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.93 | 2.65 | 68.65 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 1.00 | 3.09 | 69.65 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 1.08 | 3.60 | 70.73 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 1.18 | 4.19 | 71.91 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.29 | 4.88 | 73.20 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.41 | 5.69 | 74.60 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.52 | 6.63 | 76.12 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารเทคโนโลยี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน 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

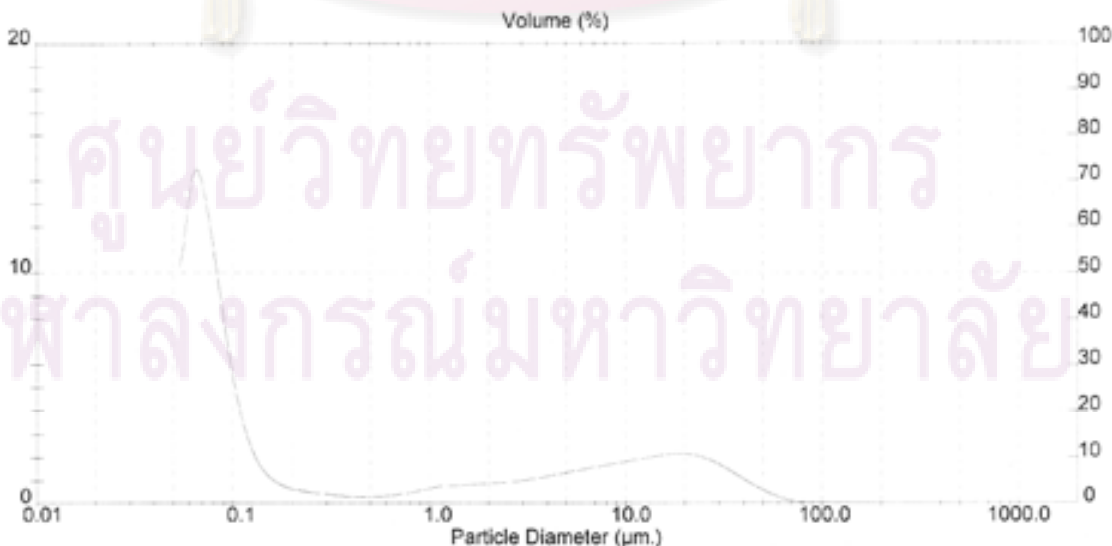
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: SiO2 (Quartz) | Run Number: 12 | Measured: 25 Sep 2006 16:26PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 400 | Analysed: 25 Sep 2006 16:26PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium: Water | | |
| Ultrasonic: 100% 4 min | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 16.4 % |
| Presentation: 30HD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000): | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.520 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0049 % Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 49.9849 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.06 um | D [v, 0.5] = 0.16 um | D [v, 0.9] = 19.76 um |
| D [4, 3] = 5.35 um | D [3, 2] = 0.12 um | Span = 1.957E+02 | Uniformity = 5.354E+01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|-------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 10.18 | 0.06 | 10.18 | 6.63 | 1.69 | 7.72 | 78.09 |
| 0.06 | 14.23 | 0.07 | 24.41 | 7.72 | 1.69 | 9.00 | 79.78 |
| 0.07 | 13.12 | 0.08 | 37.53 | 9.00 | 1.76 | 10.48 | 81.57 |
| 0.08 | 9.47 | 0.09 | 47.00 | 10.48 | 1.80 | 12.21 | 83.46 |
| 0.09 | 5.77 | 0.11 | 52.77 | 12.21 | 1.98 | 14.22 | 85.44 |
| 0.11 | 3.22 | 0.13 | 56.99 | 14.22 | 2.07 | 16.57 | 87.61 |
| 0.13 | 1.80 | 0.15 | 57.79 | 16.57 | 2.16 | 19.31 | 89.67 |
| 0.15 | 1.09 | 0.17 | 58.88 | 19.31 | 2.14 | 22.49 | 91.01 |
| 0.17 | 0.75 | 0.20 | 59.63 | 22.49 | 2.02 | 26.20 | 93.63 |
| 0.20 | 0.58 | 0.23 | 60.21 | 26.20 | 1.80 | 30.53 | 95.63 |
| 0.23 | 0.49 | 0.27 | 60.70 | 30.53 | 1.51 | 35.56 | 97.14 |
| 0.27 | 0.42 | 0.31 | 61.12 | 35.56 | 1.16 | 41.43 | 98.30 |
| 0.31 | 0.35 | 0.36 | 61.47 | 41.43 | 0.81 | 48.27 | 99.11 |
| 0.36 | 0.30 | 0.42 | 61.78 | 48.27 | 0.51 | 56.23 | 99.62 |
| 0.42 | 0.29 | 0.49 | 62.07 | 56.23 | 0.27 | 65.51 | 99.89 |
| 0.49 | 0.31 | 0.58 | 62.37 | 65.51 | 0.11 | 76.32 | 100.00 |
| 0.58 | 0.33 | 0.67 | 62.71 | 76.32 | 0.00 | 88.91 | 100.00 |
| 0.67 | 0.40 | 0.78 | 63.11 | 88.91 | 0.00 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.50 | 0.91 | 63.62 | 103.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.63 | 1.06 | 64.25 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.74 | 1.24 | 64.99 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.78 | 1.44 | 65.77 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.81 | 1.68 | 66.58 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.85 | 1.95 | 67.43 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.87 | 2.28 | 68.30 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.91 | 2.65 | 69.21 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.97 | 3.09 | 70.18 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 1.05 | 3.63 | 71.24 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 1.15 | 4.19 | 72.39 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.26 | 4.88 | 73.64 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.37 | 5.69 | 75.02 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.48 | 6.63 | 76.50 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





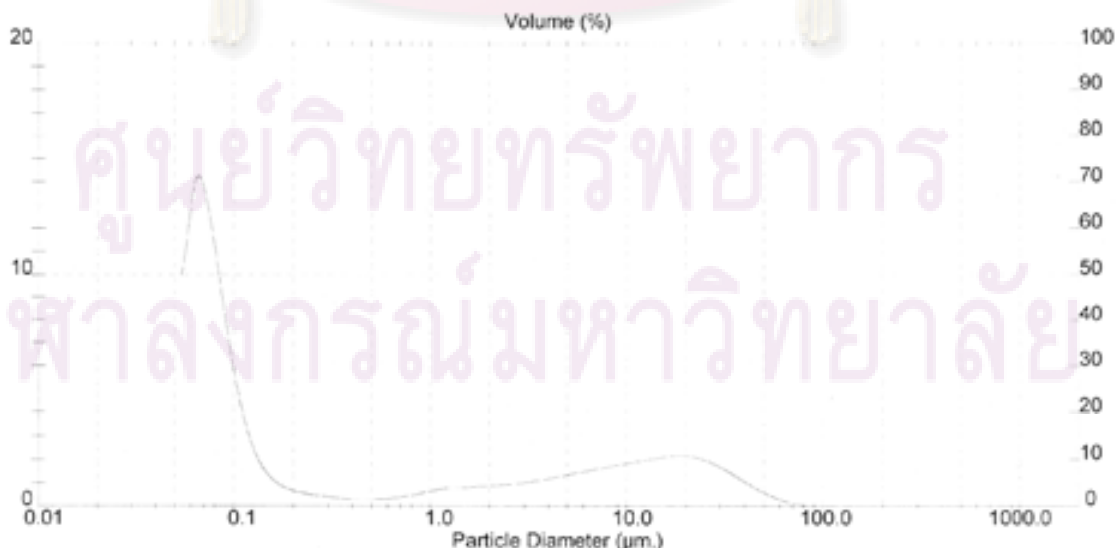
Analysis Result

| Sample Details | | |
|---|--------------------|-------------------------------|
| Sample ID: SiO2 (Quartz) | Run Number: 14 | Measured: 25 Sep 2006 16:27PM |
| Sample File: CHULA | Record Number: 402 | Analysed: 25 Sep 2006 16:27PM |
| Sample Path: C:\SI\ZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System Dispersing Medium : Water Ultrasonic : 100% 4 min | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obscuration: 16.4 % |
| Presentation: 3CHD | [Particle R.I. = (1.5295, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] | Residual: 0.571 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0049 %Vol | Density = 1,000 g / cub. cm | Specific S.A. = 49.6438 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 0.06 um | D [v, 0.5] = 0.10 um | D [v, 0.9] = 19.60 um |
| D [4, 3] = 5.33 um | D [3, 2] = 0.12 um | Span = 1.955E+02 | Uniformity = 5.260E+01 |

| Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% | Size_Low (um) | In % | Size_High (um) | Under% |
|---------------|-------|----------------|--------|---------------|------|----------------|--------|
| 0.05 | 9.84 | 0.06 | 9.85 | 6.63 | 1.69 | 7.72 | 78.18 |
| 0.06 | 13.63 | 0.07 | 23.77 | 7.72 | 1.70 | 9.00 | 79.88 |
| 0.07 | 13.05 | 0.08 | 36.82 | 9.00 | 1.80 | 10.48 | 81.68 |
| 0.08 | 9.59 | 0.09 | 46.42 | 10.48 | 1.90 | 12.21 | 83.57 |
| 0.09 | 6.96 | 0.11 | 62.37 | 12.21 | 1.99 | 14.22 | 85.56 |
| 0.11 | 3.38 | 0.13 | 65.76 | 14.22 | 2.07 | 16.57 | 87.64 |
| 0.13 | 1.91 | 0.15 | 57.66 | 16.57 | 2.15 | 19.31 | 89.79 |
| 0.15 | 1.16 | 0.17 | 58.81 | 19.31 | 2.12 | 22.49 | 91.91 |
| 0.17 | 0.79 | 0.20 | 59.60 | 22.49 | 2.00 | 26.20 | 93.90 |
| 0.20 | 0.61 | 0.23 | 60.21 | 26.20 | 1.78 | 30.53 | 95.68 |
| 0.23 | 0.50 | 0.27 | 60.71 | 30.53 | 1.48 | 35.56 | 97.16 |
| 0.27 | 0.42 | 0.31 | 61.13 | 35.56 | 1.14 | 41.43 | 98.29 |
| 0.31 | 0.35 | 0.36 | 61.48 | 41.43 | 0.80 | 48.27 | 99.09 |
| 0.36 | 0.31 | 0.42 | 61.79 | 48.27 | 0.51 | 56.23 | 99.60 |
| 0.42 | 0.29 | 0.49 | 62.08 | 56.23 | 0.28 | 65.51 | 99.88 |
| 0.49 | 0.31 | 0.58 | 62.39 | 65.51 | 0.12 | 76.32 | 100.00 |
| 0.58 | 0.34 | 0.67 | 62.72 | 76.32 | 0.00 | 88.91 | 100.00 |
| 0.67 | 0.40 | 0.78 | 63.13 | 88.91 | 0.00 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.50 | 0.91 | 63.63 | 103.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.63 | 1.06 | 64.26 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.74 | 1.24 | 65.00 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.79 | 1.44 | 65.79 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.81 | 1.68 | 66.60 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.85 | 1.95 | 67.46 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 0.88 | 2.28 | 68.34 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 0.92 | 2.65 | 69.26 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 0.98 | 3.09 | 70.24 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 1.06 | 3.60 | 71.30 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 1.16 | 4.19 | 72.46 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 1.26 | 4.88 | 73.72 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 1.38 | 5.69 | 75.10 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 1.49 | 6.63 | 76.59 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 อ.พญาไท เขตปทุมวัน 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

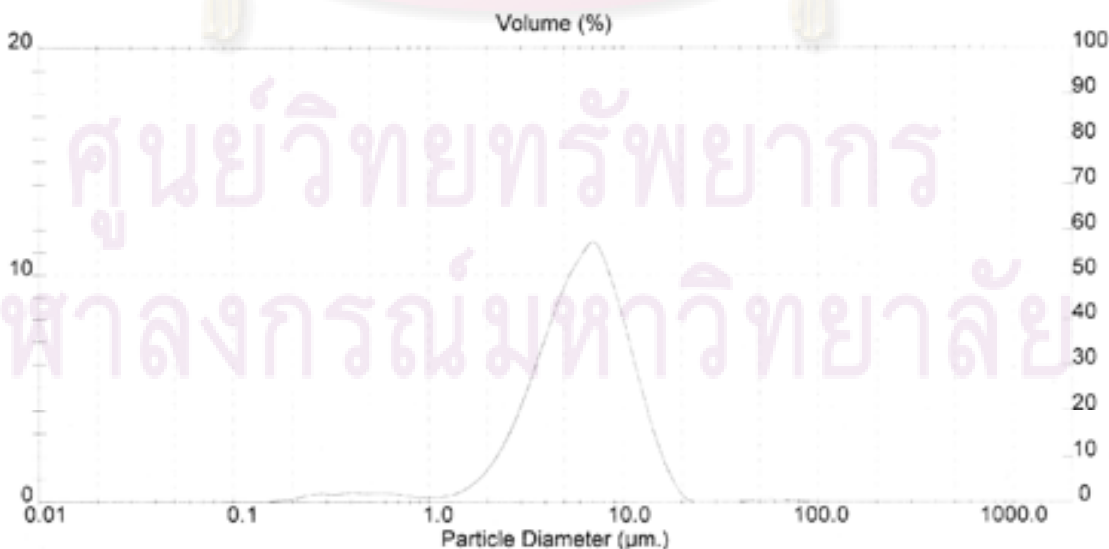
Analysis Result

| Sample Details | | |
|---|------------------|------------------------------|
| Sample ID: SIC | Run Number: 2 | Measured: 4 Jan 2007 14:24PM |
| Sample File: CHULA3 | Record Number: 2 | Analysed: 4 Jan 2007 14:24PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System Dispersing Medium : Water Ultrasonic : 100% | | |

| System Details | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS17 | Obscuration: 16.7 % |
| Presentation: 3THD | [Particle R.I. = (2.5935, 0.1000)] | Dispersant R.I. = 1.3300 | Residual: 0.793 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | | |
| Modifications: None | | | |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0072 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 1.6469 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D [v, 0.1] = 2.64 um | D [v, 0.5] = 6.18 um | D [v, 0.9] = 11.57 um |
| D [4, 3] = 6.92 um | D [3, 2] = 3.64 um | Span = 1.461E+00 | Uniformity = 4.655E-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 | 11.42 | 7.72 | 66.54 |
| 0.06 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 7.72 | 10.30 | 9.00 | 76.84 |
| 0.07 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 9.00 | 8.49 | 10.46 | 85.33 |
| 0.08 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 10.46 | 6.33 | 12.21 | 91.66 |
| 0.09 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 12.21 | 4.21 | 14.22 | 95.87 |
| 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 14.22 | 2.40 | 16.57 | 99.26 |
| 0.13 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 16.57 | 1.05 | 19.31 | 99.32 |
| 0.15 | 0.02 | 0.17 | 0.02 | 19.31 | 0.21 | 22.49 | 99.52 |
| 0.17 | 0.08 | 0.20 | 0.11 | 22.49 | 0.00 | 26.20 | 99.52 |
| 0.20 | 0.18 | 0.23 | 0.29 | 26.20 | 0.00 | 30.53 | 99.52 |
| 0.23 | 0.32 | 0.27 | 0.61 | 30.53 | 0.00 | 35.56 | 99.52 |
| 0.27 | 0.37 | 0.31 | 0.98 | 35.56 | 0.00 | 41.43 | 99.52 |
| 0.31 | 0.34 | 0.38 | 1.32 | 41.43 | 0.07 | 48.27 | 99.60 |
| 0.36 | 0.42 | 0.42 | 1.74 | 48.27 | 0.13 | 56.23 | 99.73 |
| 0.42 | 0.39 | 0.49 | 2.14 | 56.23 | 0.13 | 65.51 | 99.86 |
| 0.49 | 0.40 | 0.58 | 2.54 | 65.51 | 0.09 | 76.32 | 99.96 |
| 0.58 | 0.39 | 0.67 | 2.93 | 76.32 | 0.04 | 88.91 | 100.00 |
| 0.67 | 0.33 | 0.78 | 3.26 | 88.91 | 0.00 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.23 | 0.91 | 3.49 | 103.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.20 | 1.06 | 3.69 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.23 | 1.24 | 3.92 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.33 | 1.44 | 4.25 | 163.77 | 0.00 | 190.50 | 100.00 |
| 1.44 | 0.58 | 1.68 | 4.82 | 190.50 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 1.01 | 1.95 | 5.83 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 1.66 | 2.28 | 7.50 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 2.57 | 2.65 | 10.07 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 3.76 | 3.09 | 13.84 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 5.22 | 3.60 | 19.05 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 6.86 | 4.19 | 25.91 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 8.48 | 4.88 | 34.39 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 9.67 | 5.69 | 44.27 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 10.85 | 6.63 | 55.12 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |





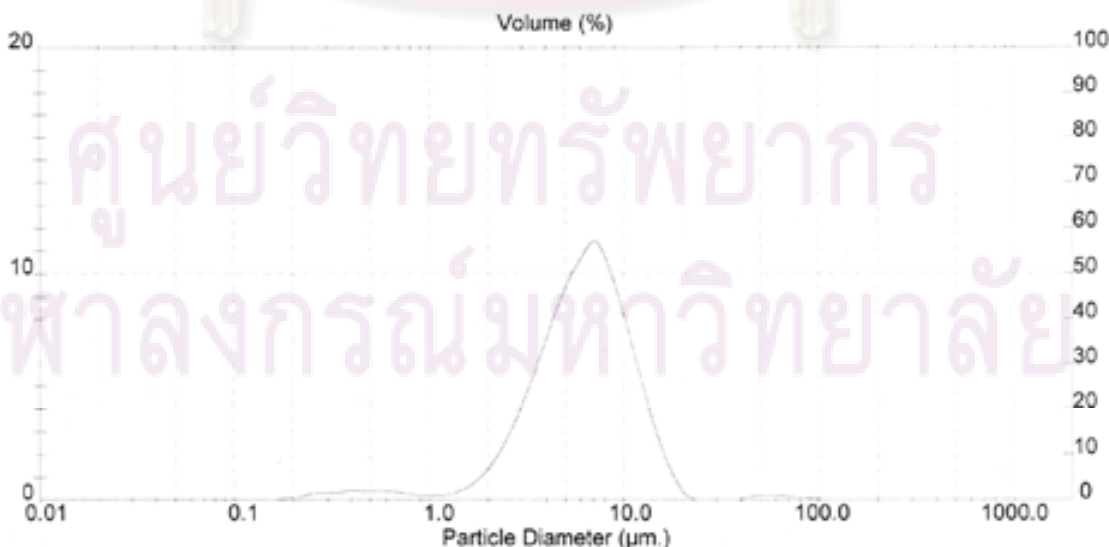
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|------------------|------------------------------|
| Sample ID: SIC | Run Number: 5 | Measured: 4 Jan 2007 14:27PM |
| Sample File: CHULA3 | Record Number: 5 | Analysed: 4 Jan 2007 14:27PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispersing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : 100% | | |

| System Details | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS17 |
| Presentation: 3THD | [Particle R.I. = (2.5935, 0.1000); | Dispersant R.I. = 1.3300] |
| Analysis Model: Polydisperse | | Obscuration: 12.6 % |
| Modifications: None | | Residual: 0.768 % |

| Result Statistics | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0055 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm | Specific S.A. = 1.5778 sq. m / g |
| Mean Diameters: | D (v, 0.1) = 2.70 um | D (v, 0.5) = 6.26 um | D (v, 0.9) = 11.88 um |
| D [4, 3] = 7.21 um | D [3, 2] = 3.80 um | Span = 1.467E+00 | Uniformity = 5.183E-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 | 11.39 | 7.72 | 65.57 |
| 0.06 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 7.72 | 10.35 | 9.00 | 75.92 |
| 0.07 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 9.00 | 8.60 | 10.48 | 84.52 |
| 0.08 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 10.48 | 6.47 | 12.21 | 90.99 |
| 0.09 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 12.21 | 4.34 | 14.22 | 95.33 |
| 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 14.22 | 2.50 | 16.57 | 97.83 |
| 0.13 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 16.57 | 1.11 | 19.31 | 98.94 |
| 0.15 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 19.31 | 0.23 | 22.49 | 99.17 |
| 0.17 | 0.05 | 0.20 | 0.05 | 22.49 | 0.00 | 26.20 | 99.17 |
| 0.20 | 0.14 | 0.23 | 0.19 | 26.20 | 0.00 | 30.53 | 99.17 |
| 0.23 | 0.28 | 0.27 | 0.45 | 30.53 | 0.00 | 35.56 | 99.17 |
| 0.27 | 0.33 | 0.31 | 0.78 | 35.56 | 0.00 | 41.43 | 99.17 |
| 0.31 | 0.33 | 0.36 | 1.11 | 41.43 | 0.14 | 48.27 | 99.30 |
| 0.36 | 0.41 | 0.42 | 1.52 | 48.27 | 0.21 | 56.23 | 99.51 |
| 0.42 | 0.40 | 0.49 | 1.92 | 56.23 | 0.20 | 65.51 | 99.71 |
| 0.49 | 0.40 | 0.58 | 2.32 | 65.51 | 0.15 | 76.32 | 99.85 |
| 0.58 | 0.39 | 0.67 | 2.71 | 76.32 | 0.10 | 89.91 | 99.95 |
| 0.67 | 0.32 | 0.78 | 3.03 | 89.91 | 0.04 | 100.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.23 | 0.91 | 3.28 | 100.58 | 0.00 | 120.67 | 100.00 |
| 0.91 | 0.19 | 1.06 | 3.45 | 120.67 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.20 | 1.24 | 3.65 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.30 | 1.44 | 3.95 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.54 | 1.68 | 4.49 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.96 | 1.95 | 5.45 | 222.28 | 0.00 | 258.95 | 100.00 |
| 1.95 | 1.61 | 2.28 | 7.06 | 258.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 2.52 | 2.65 | 9.59 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 3.72 | 3.00 | 13.31 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.00 | 5.17 | 3.60 | 18.47 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 6.78 | 4.19 | 25.25 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 8.39 | 4.88 | 33.65 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 9.77 | 5.69 | 43.42 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 10.75 | 6.63 | 54.18 | 754.23 | 0.00 | 876.67 | 100.00 |





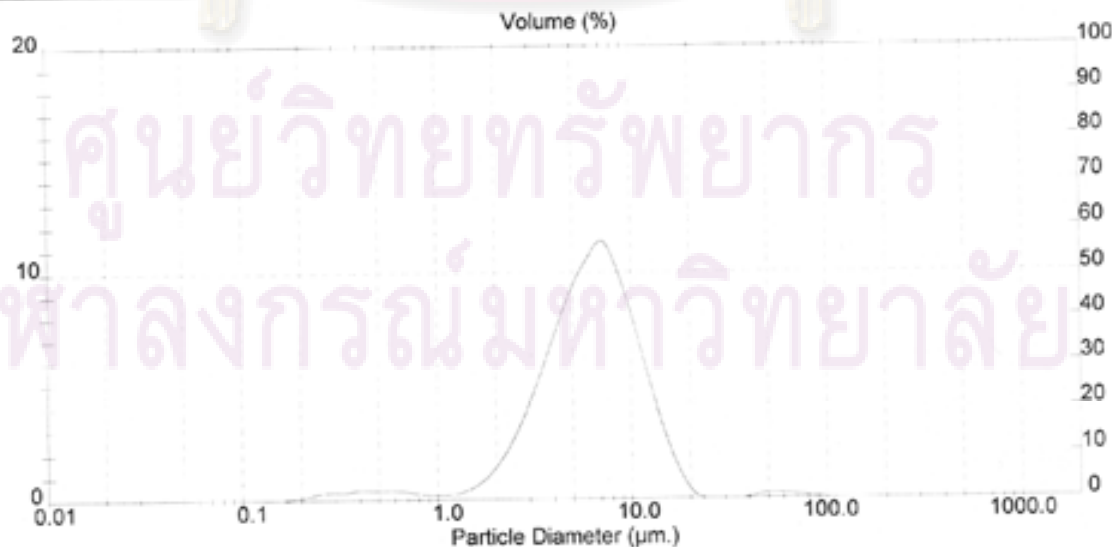
Analysis Result

| Sample Details | | |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Sample ID: SIC | Run Number: 10 | Measured: 4 Jan 2007 15:33PM |
| Sample File: CHULA3 | Record Number: 10 | Analysed: 4 Jan 2007 15:33PM |
| Sample Path: C:\SIZERS\DATA\ | | Result Source: Analysed |
| Sample Notes: Wet Analysis System | | |
| Dispensing Medium : Water | | |
| Ultrasonic : 100% | | |

| System Details | | |
|------------------------------|---|---------------------|
| Range Lens: 300RF mm | Beam Length: 2.40 mm | Sampler: MS17 |
| Presentation: 3THD | [Particle R.I. = (2.5935, 0.1000); Dispersant R.I. = 1.3300] | Obscuration: 13.2 % |
| Analysis Model: Polydisperse | | Residual: 0.770 % |
| Modifications: None | | |

| Result Statistics | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Distribution Type: Volume | Concentration = 0.0059 %Vol | Density = 1.000 g / cub. cm |
| Mean Diameter: | D (v, 0.1) = 2.68 um | D (v, 0.5) = 6.23 um |
| D [4, 3] = 7.21 um | D [3, 2] = 3.77 um | Span = 1.477E+00 |
| | | Specific S.A. = 1.5914 sq. m / g |
| | | Uniformity = 5.246E-01 |

| Size Low (um) | is % | Size High (um) | Under% | Size Low (um) | In % | Size High (um) | Under% |
|---------------|-------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| 0.05 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 6.63 | 11.33 | 7.72 | 65.75 |
| 0.06 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 7.72 | 10.28 | 9.00 | 70.02 |
| 0.07 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 9.00 | 8.52 | 10.48 | 84.54 |
| 0.08 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 10.48 | 6.41 | 12.21 | 93.95 |
| 0.09 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 12.21 | 4.30 | 14.22 | 95.25 |
| 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 14.22 | 2.49 | 16.57 | 97.74 |
| 0.13 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 16.57 | 1.12 | 19.31 | 98.86 |
| 0.15 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 19.31 | 0.25 | 22.49 | 99.11 |
| 0.17 | 0.06 | 0.20 | 0.09 | 22.49 | 0.00 | 25.20 | 99.11 |
| 0.20 | 0.15 | 0.23 | 0.21 | 26.20 | 0.00 | 30.53 | 99.11 |
| 0.23 | 0.27 | 0.27 | 0.48 | 30.53 | 0.00 | 35.56 | 99.11 |
| 0.27 | 0.34 | 0.31 | 0.82 | 35.56 | 0.01 | 41.43 | 99.12 |
| 0.31 | 0.33 | 0.36 | 1.15 | 41.43 | 0.15 | 48.27 | 99.27 |
| 0.36 | 0.41 | 0.42 | 1.56 | 48.27 | 0.22 | 56.23 | 99.48 |
| 0.42 | 0.40 | 0.49 | 1.96 | 56.23 | 0.21 | 65.51 | 99.70 |
| 0.49 | 0.40 | 0.58 | 2.36 | 65.51 | 0.15 | 76.32 | 99.86 |
| 0.58 | 0.39 | 0.67 | 2.75 | 76.32 | 0.10 | 88.91 | 99.96 |
| 0.67 | 0.32 | 0.78 | 3.07 | 88.91 | 0.04 | 103.58 | 100.00 |
| 0.78 | 0.23 | 0.91 | 3.30 | 103.58 | 0.00 | 120.87 | 100.00 |
| 0.91 | 0.19 | 1.06 | 3.49 | 120.87 | 0.00 | 140.58 | 100.00 |
| 1.06 | 0.21 | 1.24 | 3.70 | 140.58 | 0.00 | 163.77 | 100.00 |
| 1.24 | 0.31 | 1.44 | 4.01 | 163.77 | 0.00 | 190.80 | 100.00 |
| 1.44 | 0.50 | 1.68 | 4.57 | 190.80 | 0.00 | 222.28 | 100.00 |
| 1.68 | 0.98 | 1.95 | 5.55 | 222.28 | 0.00 | 268.95 | 100.00 |
| 1.95 | 1.64 | 2.28 | 7.19 | 255.95 | 0.00 | 301.68 | 100.00 |
| 2.28 | 2.56 | 2.65 | 9.75 | 301.68 | 0.00 | 351.46 | 100.00 |
| 2.65 | 3.76 | 3.09 | 13.50 | 351.46 | 0.00 | 409.45 | 100.00 |
| 3.09 | 5.20 | 3.60 | 18.70 | 409.45 | 0.00 | 477.01 | 100.00 |
| 3.60 | 6.81 | 4.19 | 25.51 | 477.01 | 0.00 | 555.71 | 100.00 |
| 4.19 | 8.41 | 4.88 | 33.92 | 555.71 | 0.00 | 647.41 | 100.00 |
| 4.88 | 9.76 | 5.69 | 43.68 | 647.41 | 0.00 | 754.23 | 100.00 |
| 5.69 | 10.73 | 6.63 | 54.41 | 754.23 | 0.00 | 878.67 | 100.00 |



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

| | |
|------------------|--|
| ชื่อ – นามสกุล | นาย รัฐ ตันศิริไพบูลย์ |
| วัน เดือน ปีเกิด | วันจันทร์ที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2526 |
| ที่อยู่ | 18/32 หมู่ 2 หมู่บ้านวิสันต์ ถนนเทพกระษัตรี ตำบลรัษฎา อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต 83000 |
| ประวัติการศึกษา | ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลภูเก็ต ปี พ.ศ. 2538 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัย ปี พ.ศ.2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี พ.ศ.2548 |
| โทรศัพท์ | 0-23216-195 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย