

## รายงานฉบับสมบูรณ์ ปีที่ 1

เรื่อง

การศึกษาวิธีการนำกากวัสดุอุณิมาเซรามิกกลับมาใช้ใหม่

โดย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กันยายน 2542

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงินอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน

รายงานฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1

การศึกษาวิธีการนำกากวัสดุอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ใหม่

โดย

นายสุรศักดิ์ ไวยวงค์สกุล  
นางสาวปราณี รัตนวลิตโรจน์  
นางสาวสวลี เสนาพิทักษ์  
นายศรีไศล ขุนทน

24 กันยายน 2542

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการเครือข่ายห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอณูมินา ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย, คุณกฤษณา ศิริเลิศมุกด์ และคุณวีระชูภรณ์ เพื่อนร่วมงานที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้ง อ.คุณฤทัย พงษ์แก้ว และ อ. นฤมล สุวัฒนนนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

## บทคัดย่อ

วัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผามาแล้วจะมีความแข็งแรงสูงมาก การจะบดให้เป็นผงเพื่อนำกลับ  
มาใช้ใหม่นั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิธีการที่จะลดความแข็งแรงของวัสดุที่เผาแล้วดังกล่าวลง  
เสียก่อนเพื่อให้บดง่ายขึ้น ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้อลูมินาเซรามิกเป็นวัสดุทดลอง โดยใช้วิธีการ  
ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อทำให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อวัสดุทำให้ความแข็งแรง  
ลดลง

จากการศึกษาพบว่า การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสจนถึง  
อุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นงานอลูมินาเซรามิกมีความแข็งแรงลดลงถึงประมาณครึ่งหนึ่งของชิ้นงานที่  
ไม่ผ่านการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำชิ้นงานไปบดในหม้อบด โดยศึกษาผลของการปรับ  
สัดส่วนสารต่อลูกบดที่ใช้และเวลาในการบดที่มีต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่บดได้ พบว่า การ  
เพิ่มปริมาณลูกบดจะช่วยลดขนาดของอนุภาคลงได้เล็กน้อยและมีผลต่อลักษณะการกระจายขนาด  
อนุภาคน้อยมาก โดยจะช่วยให้อนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมเพิ่มมากขึ้น ส่วนการบดเป็นเวลานาน  
ขึ้นจะช่วยลดขนาดได้มากกว่าการเพิ่มปริมาณลูกบดและยังทำให้ลักษณะการกระจายขนาดอนุภาค  
เปลี่ยนไปอีกด้วย

## Abstract

Main Problem to powderise fired ceramics for recycling is due to its strengthness. Aim of the study is to overcome such difficulty. Here, alumina ceramics, which is used as testing material, was quenched from 200°C to room temperature. The sample was then, ground in ball mill by varying sample : grinding media ratios and grinding time.

The results show that strengthness of alumina samples decreases by a factor of two. In additions, particle size and its distribution are more sensitive to grinding time than sample : grinding media ratio. Long grinding time has more effect on reducing particle size than increase grinding media and also give different particle size distribution

แบบรายงานฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1 โครงการวิจัยและพัฒนา/ศึกษา/ทำงาน

ของ

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ

---

- ชื่อโครงการ  
(ภาษาไทย) การศึกษาวิธีการนำกากวัสดุคูมيناเซรามิกกลับมาใช้ใหม่  
(ภาษาอังกฤษ) Study of Method to Recycle Alumina Ceramic Fired Scrap
- ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา/ศึกษา/ทำงาน ปีงบประมาณ 2542 จำนวนเงิน 530,300 บาท
- เริ่มทำการวิจัยและพัฒนา/ศึกษา/ทำงาน เมื่อ (เดือน, ปี) 1 ตุลาคม 2541
- รายงานฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1 ของการวิจัยและพัฒนา/ศึกษา/ทำงาน ครั้งที่ 1/2542  
เดือน ตุลาคม 2541 ถึง เดือน กันยายน 2542
- คณะผู้วิจัย  
นาย สุรศักดิ์ ไหวทวงศ์สกุล หัวหน้าโครงการ  
นางสาว ปราณีย์ รัตนวลิตโรจน์ นักวิจัย  
นางสาว สวลี เสนาพิทักษ์ นักวิจัย  
นาย ศรีโฉล ขุนทน นักวิจัย

## 6. รายละเอียดเกี่ยวกับผลงานความก้าวหน้าของโครงการวิจัย

### 6.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากวัสดุเซรามิกกลับมาใช้ผสมในเนื้อดินปั้นเดิม เพื่อเป็นการลดปริมาณกากวัสดุในอุตสาหกรรมและลดต้นทุนในการจัดซื้อวัตถุดิบ โดยหาวิธีการที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดและไม่ต้องดัดแปลงขบวนการผลิตเดิมมากนัก รวมทั้งจะต้องไม่ทำให้สมบัติของเนื้อวัสดุที่ผสมกากวัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอีกด้วย

### 6.2 เป้าหมายของโครงการ

1. ศึกษาวิธีการบดวัสดุอุมินาที่ผ่านการเผามาแล้ว
2. ศึกษาผลที่เกิดจากการนำกากวัสดุอุมินาที่บดแล้วมาผสมลงในเนื้อดินปั้นเดิม

### 6.3 ผลงานวิจัยและพัฒนา/ศึกษา/ทำงาน ที่ได้ทำไปแล้ว

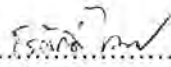
1. การศึกษาผลของการ Quenching ที่มีต่อความแข็งแรงของวัสดุอุมินาที่เผาแล้ว
2. การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสารต่อถูกบดและเวลาที่ใช้ในการบดที่มีต่อขนาดและลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคที่บดได้

ความก้าวหน้าของผลงานวิจัยและพัฒนา/ศึกษา/ทำงาน ตามแผนงานในปีงบประมาณ 2542

กิจกรรม	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. รวบรวมข้อมูลเบื้องต้น	←	→											
2. เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย		←	→										
3. เตรียมชิ้นงานที่จะใช้เป็น Fired Scrap					←	→							
4. ทำการ quenching และทดสอบความแข็งแรงเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไป						←	→						
5. บดกากวัสดุและศึกษาลักษณะของผงกากวัสดุที่ได้								←	→				

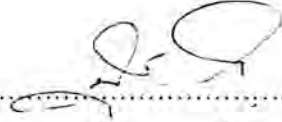
## 7. งานตามโครงการที่จะทำต่อไป

นำกากวัสดุที่บดได้แล้วมาผสมกับสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเป็นเนื้อดินปั้น และนำไปทำการขึ้นรูปเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่เดิมกากวัสดุที่บดได้แล้วกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากสารตั้งต้น โดยจะศึกษาทั้งสมบัติก่อนเผาและหลังเผา

ลงชื่อ ..... 

(นาย สุรศักดิ์ ไวยวงษ์สกุล)

หัวหน้าโครงการ

ลงชื่อ ..... 

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

รองผู้อำนวยการสถาบันฯ ฝ่ายวิชาการและวิจัย  
รักษาราชการแทนผู้อำนวยการสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ

24 กันยายน 2542



## บทที่ 1

### บทนำ

วัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้ว (Fired Ceramic) ที่มีตำหนิจนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นับเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมที่กำจัดได้ค่อนข้างยาก โดยทั่วไปแล้ว การกำจัดของเสียประเภทนี้มักจะนำไปถมที่ เพราะเป็นวิธีการที่สะดวกและประหยัดที่สุด อย่างไรก็ตามก็เป็นวิธีที่ต้องใช้พื้นที่ในการกำจัดมาก อีกทั้งยังเป็นการสูญเสียทรัพยากรไปโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น การนำของเสียเหล่านี้ไปถมที่ยังอาจจะก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่อพื้นดินในบริเวณที่นำไปถมด้วย ดังนั้น จึงได้มีความพยายามในการหาวิธีนำของเสียประเภทนี้กลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากของเสียเหล่านี้เป็นวัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผามาแล้ว จึงเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงมาก การจะนำกลับมาใช้ใหม่ จึงต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการบดของเสียดังกล่าวให้อยู่ในรูปผงที่มีความละเอียดพอที่จะนำไปใช้งานได้เสียก่อนที่จะนำวัสดุดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ต่อไป

งานวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการบดวัสดุอลูมินา (Alumina) ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกที่นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมายชนิดหนึ่งให้เป็นผงละเอียดที่มีลักษณะต่างๆ ใกล้เคียงกับวัตถุดิบเริ่มต้นมากที่สุด และจะศึกษาผลของการนำผงวัสดุที่บดได้นี้มาใช้ผสมกับวัตถุดิบตั้งต้นที่มีต่อสมบัติของชิ้นงานทั้งก่อนเผาและหลังเผา การเลือกอลูมินามาศึกษาเนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสไปในระหว่างการเผา แม้จะเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,650 องศาเซลเซียสก็ตาม (เล็ก อุดตมะสิด และ สุรศักดิ์ ไวยวงษ์สกุล, 2539) ทำให้การนำผงวัสดุที่บดได้ไปใช้ประโยชน์จึงไม่มีความยุ่งยากมากนัก นอกจากนี้ อลูมินายังเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุเซรามิกทั่วไป ดังนั้น จึงสามารถนำวิธีการที่ใช้ในการบดวัสดุอลูมินานี้ไปใช้กับการบดวัสดุประเภทอื่นๆ ได้โดยไม่ต้องดัดแปลงกระบวนการมากนักอีกด้วย

#### 1.1 การแตกหักของวัสดุ

การที่วัสดุจะถูกบดให้มีขนาดเล็กลงได้นั้น วัสดุดังกล่าวจะต้องได้รับแรงจำนวนหนึ่งเพื่อให้เกิดการแตกหักเป็นชิ้นเล็กลงเรื่อยๆ แรงดังกล่าวจะเข้าไปทำให้ตำหนิ (Flaw) ต่างๆ ที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุอยู่แล้วนั้น เช่น ขอบเกรน รูพรุน หรือ รอยแตกเล็กๆ รวมทั้งรอยแยกที่เกิดจากการมีสิ่งเจือปนเข้าไปแทรกอยู่ ขยายตัวยาวออกไป จากการศึกษาของ Griffith (Somasundaran, 1978) พบว่าแรงที่ต้องการในการทำให้วัสดุแตกหักนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นแล้วยังแปรผกผันกับความยาวของตำหนิในเนื้อวัสดุนั้นด้วย ดังนี้

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{L}}$$

เมื่อ	$\sigma$	คือ แรงเค้นแตกหัก (Fracture stress) ของชิ้นงาน
	$E$	คือ ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ของวัสดุตั้งกล่าว
	$\gamma$	คือ พลังงานในการแตกหัก (Fracture energy) ของวัสดุตั้งกล่าว
	$L$	คือ ความยาวของรอยแตก

จากความสัมพันธ์ของ Griffith จะเห็นได้ว่า ถ้าหากสามารถเพิ่มความยาวของรอยแตก ( $L$ ) ได้แล้ว จะทำให้แรงที่ต้องใช้ในการแตกหักของชิ้นงานนั้นลดลงได้ วิธีการเพิ่มความยาวของรอยแตกในชิ้นงานเซรามิกมีอยู่หลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากก็คือ การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) โดยการนำวัสดุเซรามิกไปทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว Hasselman (Shashidhar and Reed, 1990) อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า เมื่อวัสดุเปราะเช่น เซรามิกผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว นั้น พลังงานศักย์ยืดหยุ่น (Elastic Energy) ที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการแตกหัก-สร้างผิวใหม่ (Fracture-Surface Energy) และพลังงานจลน์เพื่อขยายรอยแตกออกไป เมื่อตัวอย่างถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยที่ผลต่างของอุณหภูมิมากกว่าค่าวิกฤติ  $\Delta T_c$  ค่าหนึ่งแล้ว รอยแตกขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวที่ไม่เท่ากันของส่วนต่างๆ ในชิ้นงานจะดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นและขยายตัวออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง จากการศึกษาพบว่าค่า  $\Delta T_c$  ของวัสดุเซรามิกจะอยู่ที่ประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส

## บทที่ 2 วิธีการทดลอง

### 2.1 วัตถุดิบที่ใช้

วัตถุดิบ	หน้าที่	ปริมาณการใช้
1. Alumina A-13 (Alcoa)	Body	75%
2. น้ำกลั่น	ตัวทำละลาย	25%
3. Magnesium Oxide (MgO)	Sintering agent	0.06 wt% of Alumina
4. Polyvinyl Alcohol (PVA)	Binder	1 wt% of Alumina
5. Dispex N 40	Deflocculant	0.36-0.4 wt% of Alumina

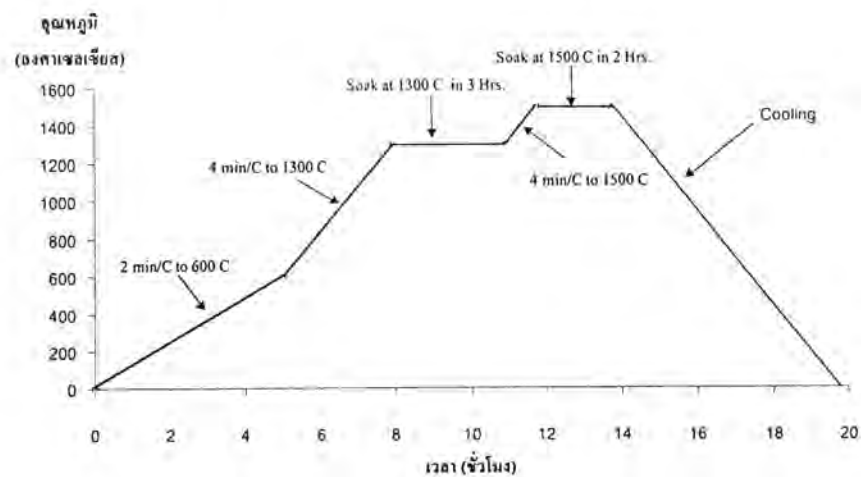
### 2.2 การเตรียม Fired Scrap

2.2.1 ผสมวัตถุดิบทั้งหมดเข้าด้วยกัน (โดยสำหรับ PVA ต้องนำไปละลายน้ำก่อนจะนำมาผสมกับวัตถุดิบตัวอื่นๆ ในอัตราส่วน PVA : น้ำ 1 : 10 ส่วน) โดยเครื่องผสมให้เข้ากันดี

2.2.2 นำไปเทแบบ (Casting) ในแบบปูนปลาสเตอร์ ให้เป็นชิ้นงานรูปแท่ง ขนาด 2x9x1 เซนติเมตร

2.2.3 อบชิ้นงานให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2.4 นำไปเผาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ตารางการเผาดังรูปที่ 1



รูปที่ 2.1 ตารางการเผาชิ้นงาน

## 2.3 การ Quench ชิ้นงานและทดสอบสมบัติความแข็งแรง

- 2.3.1 นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- 2.3.2 นำชิ้นงานออกจากเตาอบ และแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส) ทันที ทิ้งไว้ในน้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที
- 2.3.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการ Quench ไปอบให้แห้ง
- 2.3.4 นำชิ้นงานจากข้อ 2.3.3 ไปทดสอบความแข็งแรงดัด โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine

## 2.4 การบด Scrap และตรวจสอบลักษณะของกากวัสดุที่บดได้

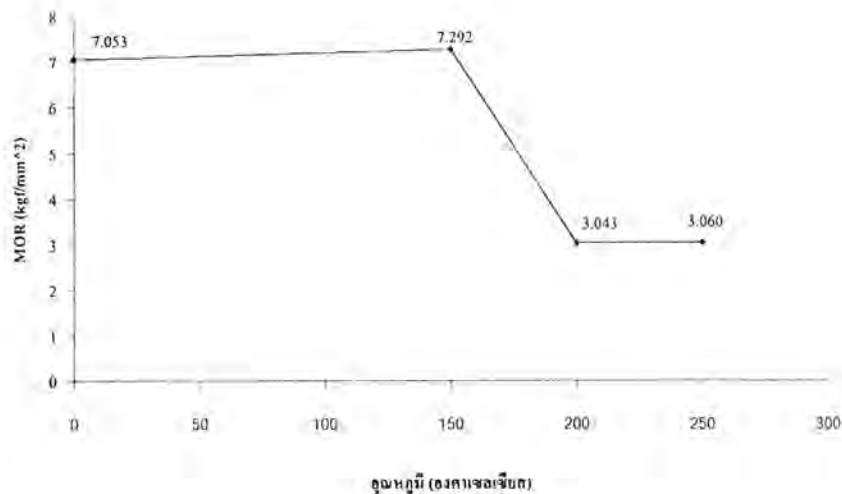
- 2.4.1 บดชิ้นงานที่ผ่านการ Quench และทดสอบความแข็งแรงแล้วใน Jaw crusher ให้เป็นผงวัสดุที่มีขนาดอยู่ในระดับมิลลิเมตร
- 2.4.2 นำสารที่บดได้จากข้อ 2.4.1 ไปบดอีกครั้งใน Ball mill โดยปรับ
  - สัดส่วนระหว่างสารที่บดต่อลูกบดที่ใช้ เป็น 1 : 1 และ 1 : 1.5 โดยน้ำหนัก
  - เวลาที่ใช้ในการบด เป็น 24 และ 48 ชั่วโมง
- 2.4.3 นำผงวัสดุที่บดได้จากข้อ 2.4.2 ไปตรวจสอบลักษณะ โดยเปรียบเทียบกับผงวัสดุอลูมินา A-13 ที่ใช้ โดยจะตรวจสอบลักษณะต่างๆ ได้แก่
  - การวิเคราะห์เฟสของอนุภาค (Phase analysis) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer
  - การกระจายขนาด (Particle size distribution, PSD) ของอนุภาค
  - รูปร่างของอนุภาค ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

### บทที่ 3

#### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

##### 3.1 ผลของการ Quench ที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน

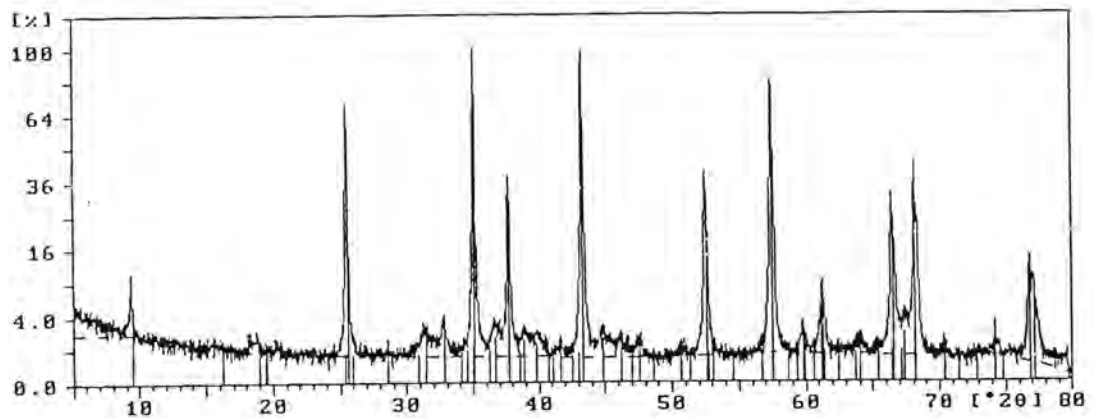
รูปที่ 3.1 แสดงผลการวัดค่า MOR ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าว จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อให้อุณหภูมิเริ่มต้นในกระบวนการเย็นตัวสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส จะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการเริ่มต้นต่ำกว่านั้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นสูงขึ้นเป็น 250 องศาเซลเซียสกลับพบว่า ความแข็งแรงของวัสดุจะไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าควรที่จะเลือกอุณหภูมิเริ่มต้นในกระบวนการเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยให้ความแข็งแรงลดลงมากและใช้พลังงานในการ Quench ต่ำที่สุด



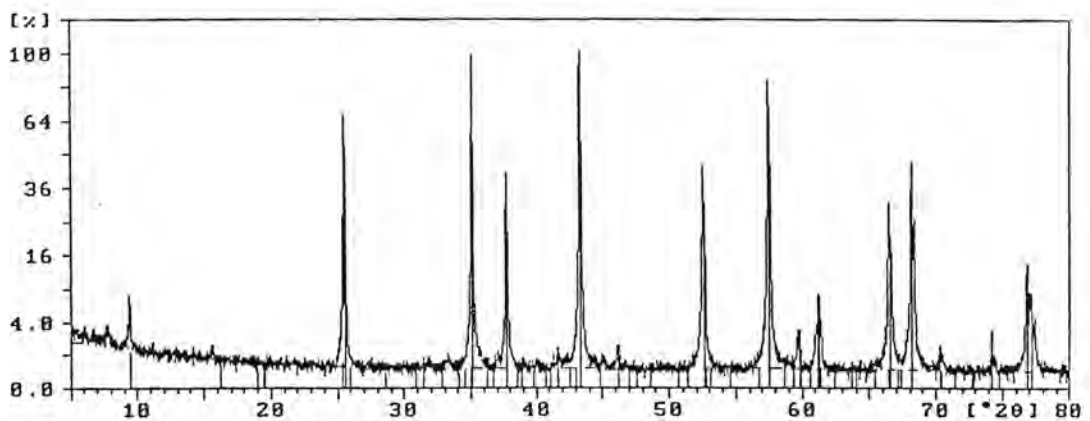
รูปที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการ Quenching ที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.2 การวิเคราะห์เฟสของอนุภาค

รูปที่ 3.2 และ 3.3 เป็นผลการวิเคราะห์เฟสจากเครื่อง XRD ของวัตถุดิบอลูมินา A-13 และผงวัสดุที่ผ่านการเผาและบดแล้วตามลำดับ จะพบว่าทั้งสองรูปมีลักษณะเกือบจะเหมือนกันทุกประการ ประกอบไปด้วยแอลฟาอลูมินา ( $\alpha$ -alumina) เป็นเฟสหลัก และพบเฟสของทัลคัม (Talcum) เล็กน้อย ซึ่งน่าจะเกิดจากการรวมกันของอลูมินากับ MgO ที่เติมลงไปเป็น Sintering agent



รูปที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์เฟสจากเครื่อง XRD ของสารตั้งต้น อลูมินา A-13



รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์เฟสจากเครื่อง XRD ของผงวัสดุที่ผ่านการเผา  
ที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส

### 3.3 การวิเคราะห์ขนาดและลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาค

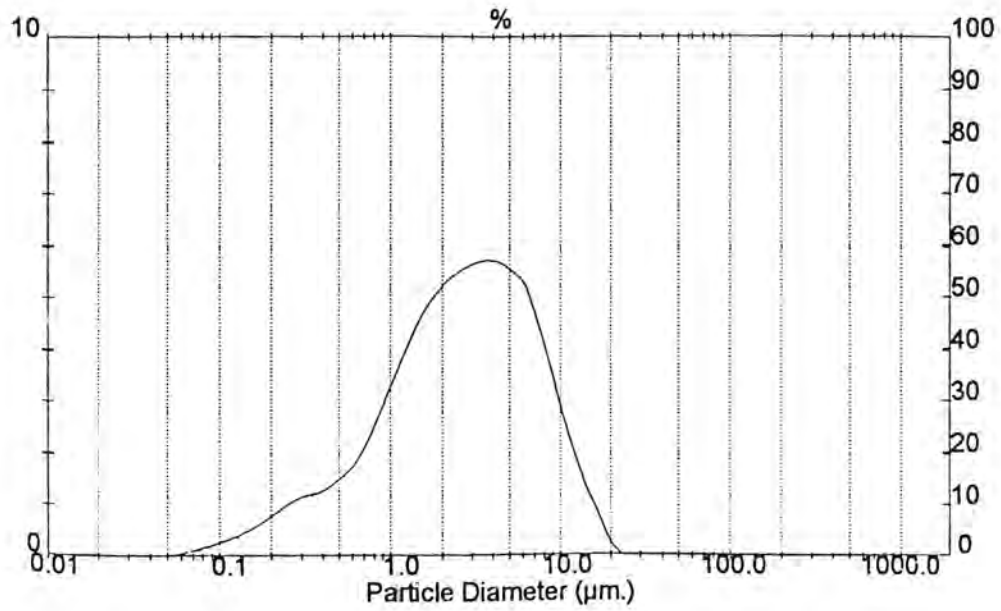
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวเฉพาะของผงตัวอย่างที่ผ่านการบดด้วยเงื่อนไขต่างๆ เทียบกับวัสดุคิบอลูมินา A-13 เริ่มต้น รูปที่ 3.4 ถึง 3.8 เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายขนาดอนุภาควัสดุคิบเริ่มต้นเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการบดเงื่อนไขต่างๆ จากตารางแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านการเผาแล้วนั้น การเพิ่มปริมาณลูกบดจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเพิ่มเวลาในการบดซึ่งจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กลงมากกว่า และเมื่อเทียบระหว่างสารตั้งต้นกับตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านการเผาแล้วและใช้เงื่อนไขในการบดเดียวกัน พบว่าตัวอย่างที่ 2 จะมีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่าเล็กน้อยและมีการกระจายขนาดของอนุภาคกว้างกว่า เนื่องจากการเผาจะทำให้อนุภาคเกาะกันแน่นขึ้น การบดจึงทำได้ยากกว่า

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวเฉพาะของ  
ตัวอย่างที่บดด้วยเงื่อนไขต่างๆ

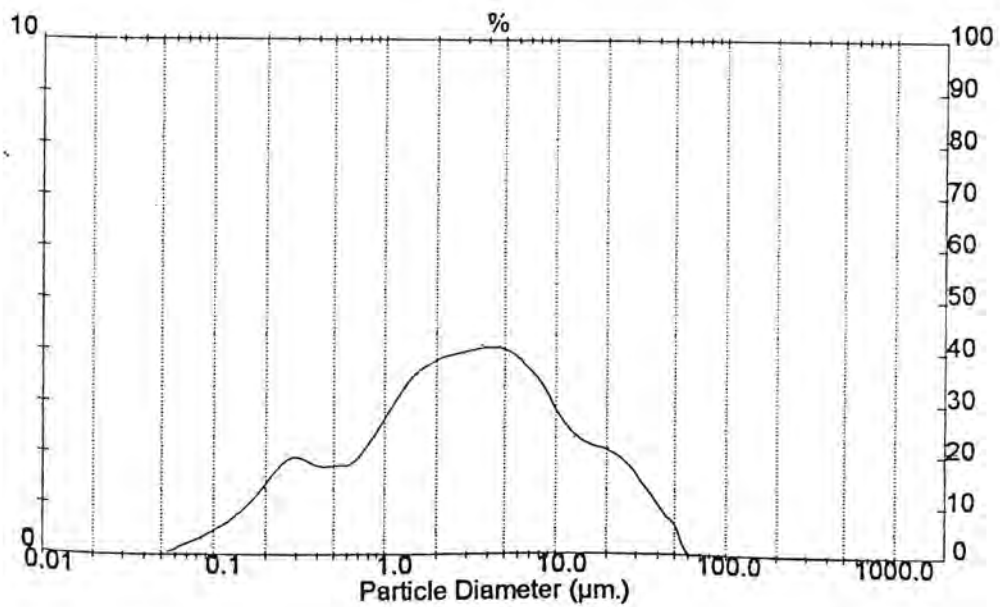
ตัวอย่าง	ตัว	เงื่อนไขในการบด	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)			พื้นที่ผิวเฉพาะ* (m <sup>2</sup> /g)			
			เฉลี่ย	เปอร์เซนไทล์ที่ 10	เปอร์เซนไทล์ที่ 50		เปอร์เซนไทล์ที่ 90		
		สารตั้งต้น							
1	Quenched	สาร : ลูกบด 1:1.5 บด 24 ชม.	3.82	0.52	2.72	8.68	1.2958		
2	Quenched	สาร : ลูกบด 1:1 บด 24 ชม.	6.57	0.28	2.85	18.94	1.7877		
3	Quenched	สาร : ลูกบด 1:1.5 บด 24 ชม.	5.26	0.26	2.62	13.64	1.9538		
4	Quenched	สาร : ลูกบด 1:1 บด 48 ชม.	3.81	0.28	2.37	9.35	1.9426		
		4	Quenched	สาร : ลูกบด 1:1.5 บด 48 ชม.	2.44	0.25	1.79	5.62	2.1749

\* เป็นค่าที่คำนวณโดยคิดว่าอนุภาคทั้งหมดมีรูปร่างเป็นทรงกลม

จากกราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาค พบว่า ตัวอย่างที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านการเผาและนำมาบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 3.5 และ 3.6) จะมีลักษณะการกระจายตัวเกือบจะเป็นแบบเส้นโค้งมาตรฐานที่ชัดเจน ส่วนตัวอย่างที่ 3 และ 4 ซึ่งบดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะมีการกระจายขนาดในลักษณะที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นโค้งปกติอย่างชัดเจน โดยมีจำนวนอนุภาคที่มีขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก

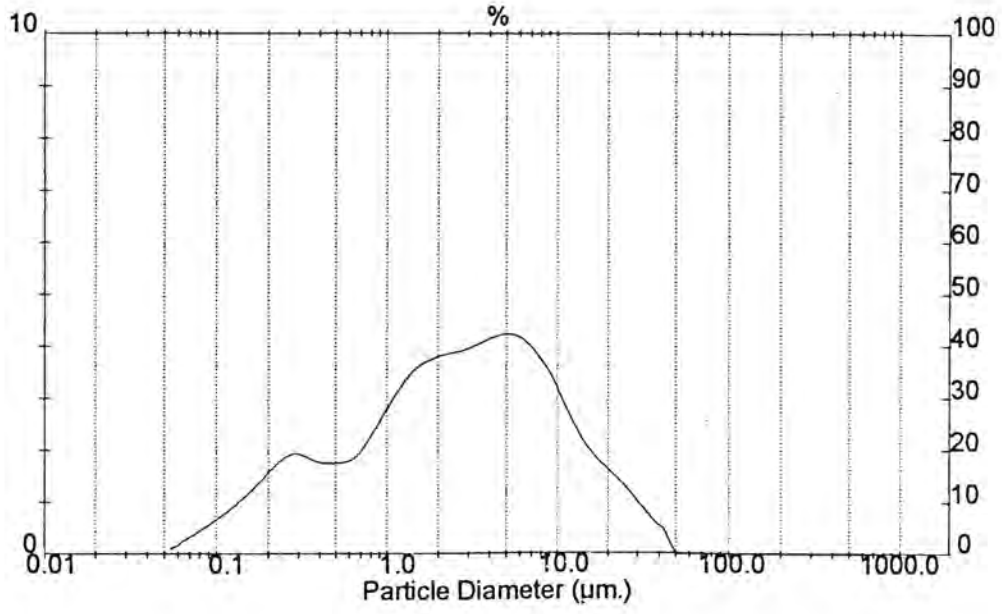


รูปที่ 3.4 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นที่บดแล้ว

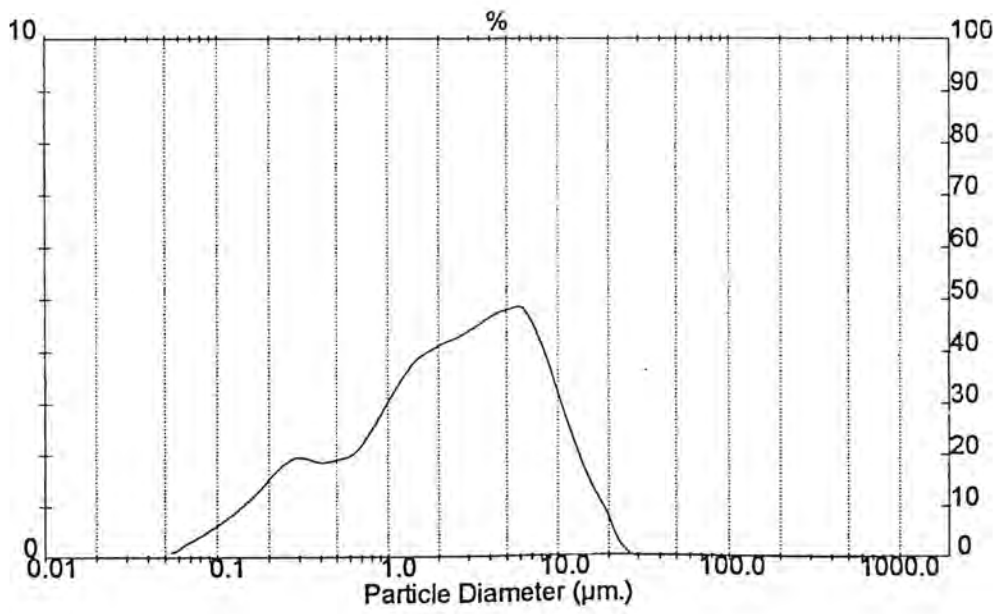


รูปที่ 3.5 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 1

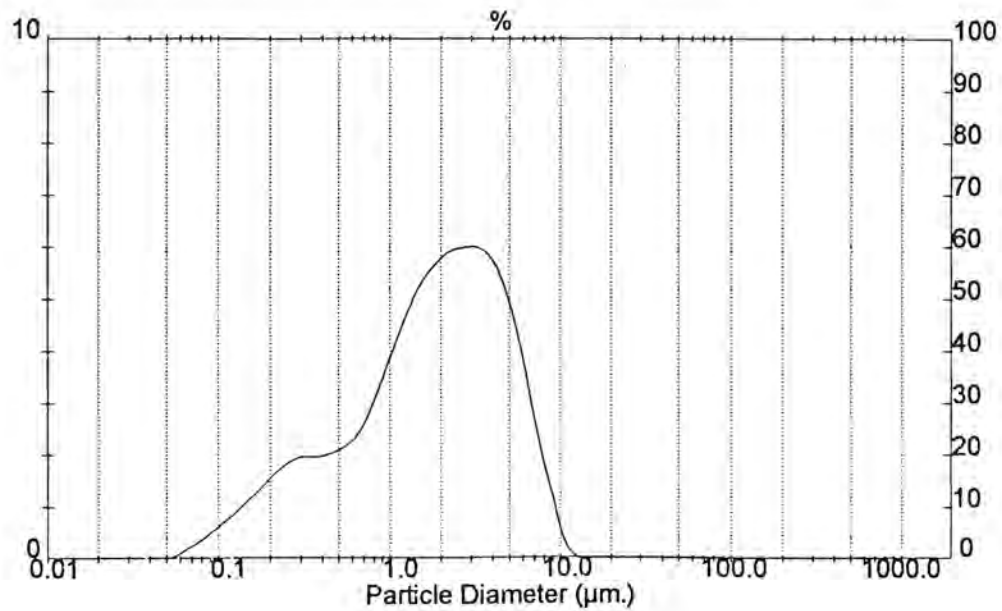




รูปที่ 3.6 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 3.7 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 3

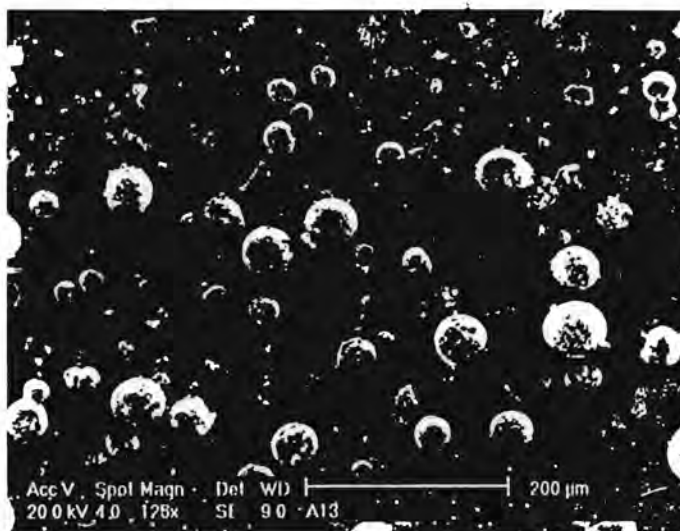


รูปที่ 3.8 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 4

### 3.4 การศึกษารูปร่างของอนุภาค

รูปที่ 3.9 ถึง 3.11 เป็นภาพถ่ายอนุภาคของสารตั้งต้นที่ผ่านการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่กำลังขบย 125, 1,000 และ 5,000 เท่าตามลำดับ จะเห็นว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลม มีรอยบุ๋มเล็กๆ ตรงกลางและมีผิวค่อนข้างเรียบเป็นเนื้อเดียว

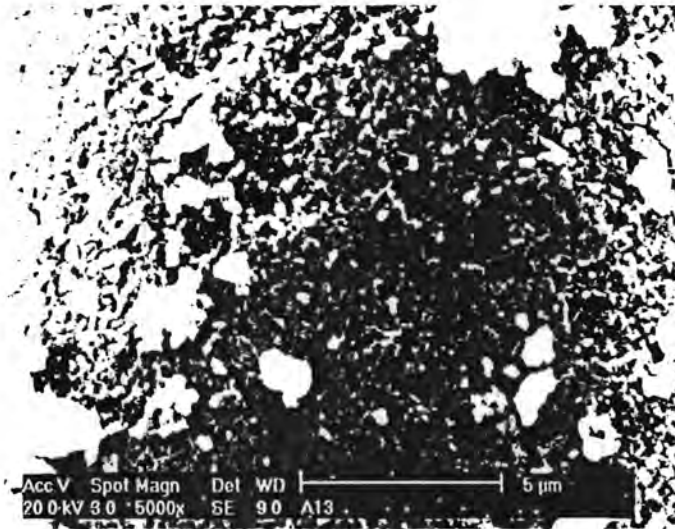
รูปที่ 3.12 – 3.15 เป็นภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ ที่กำลังขบย 125 เท่า พบว่า ในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ 1 ซึ่งบดด้วยอัตราส่วนสารต่อลูกบด 1 : 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นั้น จะเห็นลักษณะอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและเป็นก้อนไม่กลมอยู่ปะปนกัน และมีอนุภาคเล็กๆ จำนวนน้อย ในขณะที่ตัวอย่างที่ 2 (รูปที่ 3.13) ซึ่งบดด้วยเวลาเท่ากันแต่ใช้สัดส่วนลูกบดเพิ่มขึ้นจะมีอนุภาคทรงกลมในสัดส่วนมากกว่า ส่วนตัวอย่างที่ 3 และ 4 (รูปที่ 3.14 – 3.15) ซึ่งบดเป็นเวลา 48 ชั่วโมงนั้นจะมีอนุภาคที่มีรูปร่างทรงกลมมากขึ้น และยังพบอนุภาคทรงกลมบางส่วนแตกออกแบบผ่าซีกอีกด้วย



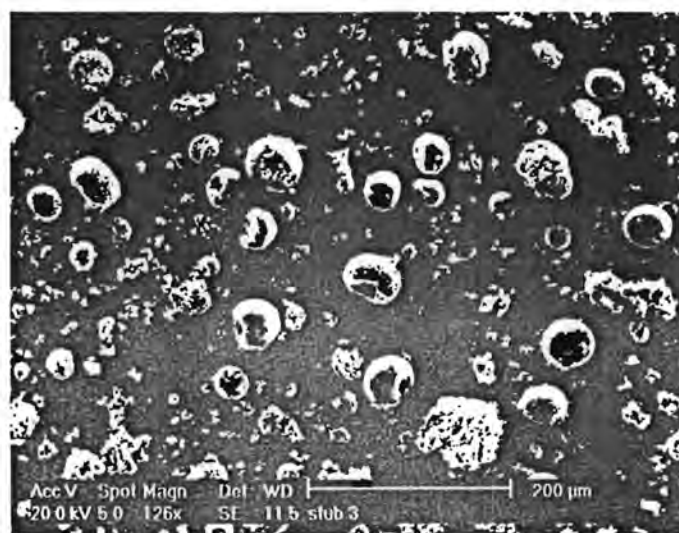
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายของอนุภาคของสารตั้งต้นที่กำลังขยาย 125 เท่า



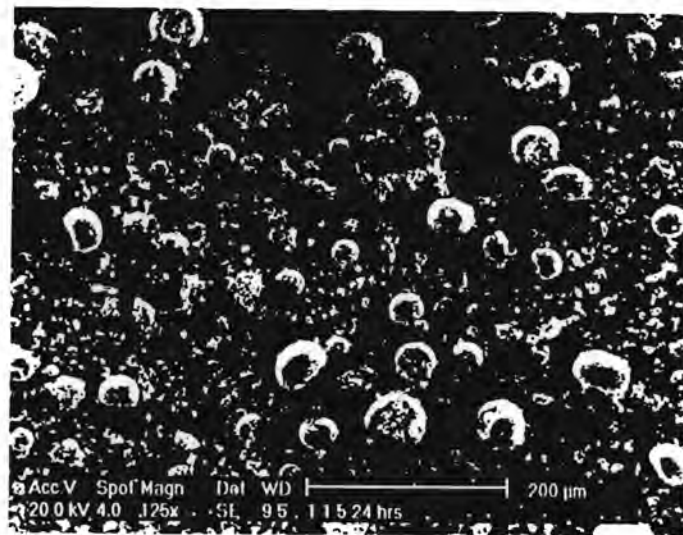
รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายของอนุภาคของสารตั้งต้นที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



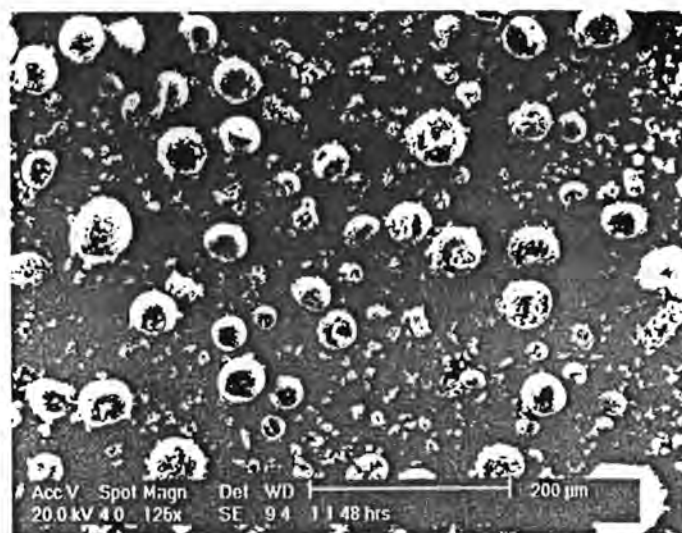
รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายของอนุภาคของสารตั้งต้นที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



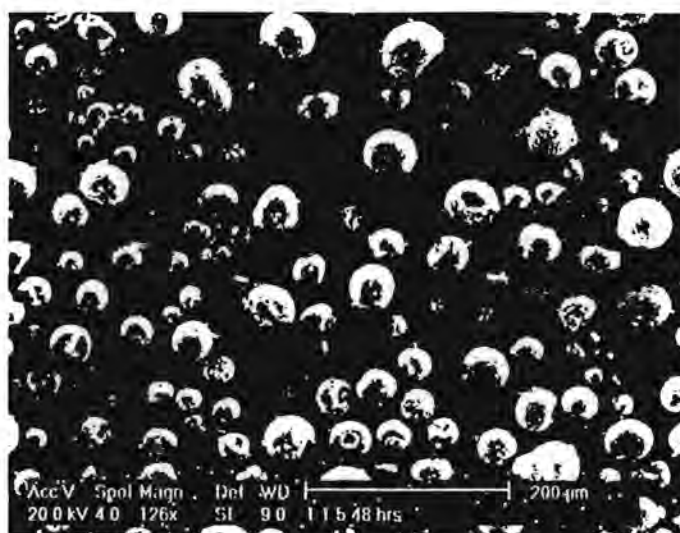
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 1 ที่กำลังขยาย 125 เท่า



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 2 ที่กำลังขยาย 125 เท่า



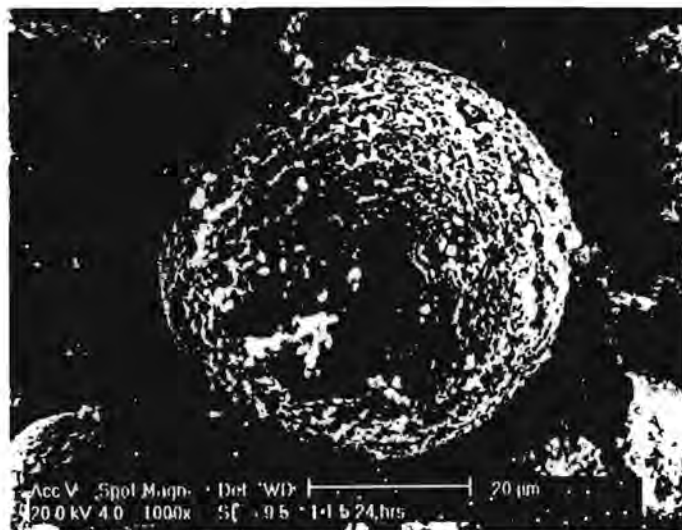
รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 3 ที่กำลังขยาย 125 เท่า



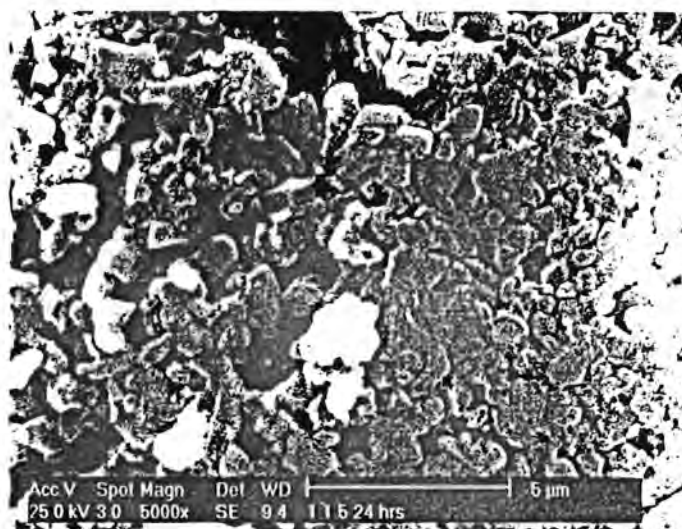
รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 4 ที่กำลังขยาย 125 เท่า

รูปที่ 3.16 และ 3.17 เป็นภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่าของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมในรูปที่ 14 จากภาพจะเห็นได้ว่าอนุภาคทรงกลมดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายกับรูปโดนัท มีรอยบุ๋มขนาดใหญ่อยู่ตรงกลางคล้ายกับในรูปที่ 12 ซึ่งเป็นอนุภาคของสารตัวอย่างที่บดด้วยเงื่อนไขเดียวกัน แต่เมื่อสังเกตลักษณะของพื้นผิวในรูปที่ 18 กลับพบว่า อนุภาคทรงกลมดังกล่าวมิได้มีผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวในรูปเดียวกันคล้ายกับรูปที่ 13 แต่จะประกอบไปด้วยเกรนเล็กๆ จำนวนมากเกาะติดกัน

รูปที่ 3.18 เป็นภาพถ่ายของผิวรอยแตกของชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเทียบกับรูปที่ 3.19 แล้ว พบว่าลักษณะของผิวอนุภาคอลูมินาที่ผ่านการบดแล้วจะมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างของชิ้นงานอลูมินาที่เผาที่อุณหภูมิเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการบดอนุภาคไม่ได้ทำให้ลักษณะ โครงสร้างเล็กๆ ภายในเปลี่ยนแปลงไป

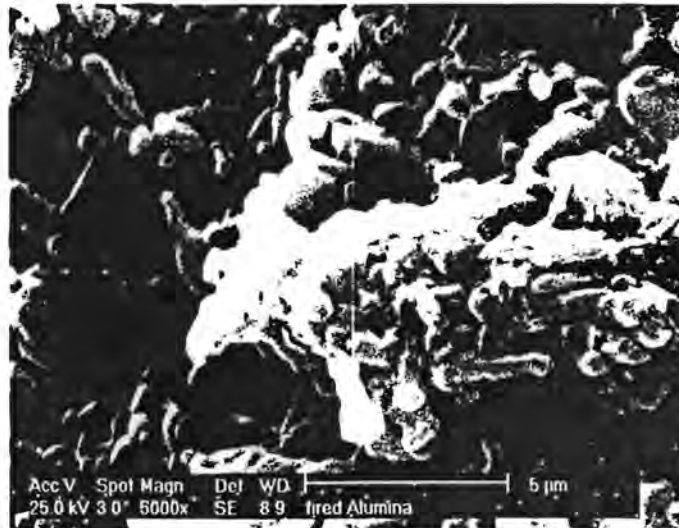


รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายของอนุภาคทรงกลมในตัวอย่างที่ 2 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายของอนุภาคทรงกลมในตัวอย่างที่ 2 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า





รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายฟิวรอยแตกของชิ้นงานอลูมินาที่เผา  
ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากข้อมูลดังกล่าวอาจจะสรุปถึงกลไกในการบดได้ดังนี้ โครงสร้างของชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะเป็นเกรนเล็กๆ เกาะติดกัน เมื่อนำไปบดให้แตกด้วย Jaw crusher เกรนดังกล่าวจะเกาะกันเป็นอนุภาคเล็กๆ ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน แต่เมื่อนำไปบดในหม้อบด อนุภาคดังกล่าวจะได้รับทั้งแรงเสียดสีและแรงกระแทกจากการเคลื่อนที่ของลูกบด โดยแรงเสียดสีจะทำให้เกรนเล็กๆ ที่ผิวหลุดออกไปก่อนซึ่งจะทำให้อนุภาคมีผิวที่เรียบขึ้นและมีรูปร่างเป็นทรงกลม ส่วนเกรนเล็กๆ ที่หลุดออกมาก็จะปรากฏเป็นอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากที่พบในการวัดการกระจายขนาดของอนุภาค หลังจากนั้นการกระแทกกันจะทำให้อนุภาคทรงกลมบางส่วนแตกออกแบบผ่าซีกและมีขนาดเล็กลง และเนื่องจากการเพิ่มปริมาณลูกบดและเวลาในการบดจะทำให้ความถี่ในการชนกันของอนุภาคกับลูกบดมีมากขึ้น จึงทำให้ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณลูกบดมากขึ้นและบดนานขึ้นจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงและมีจำนวนอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้น



## บทที่ 4

### สรุป

#### สรุปผลการทดลองที่ผ่านมา

1. การ Quench จากที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุที่เผาแล้วลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่งของวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการ Quench

2. ผลของการปรับตัวแปรในการบดด้วยหม้อบดที่มีต่อขนาด, ลักษณะการกระจายขนาด และรูปร่างของอนุภาค เป็นดังนี้

2.1 การเพิ่มสัดส่วนของลูกบดที่ใช้ในการบด จะทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กลงเล็กน้อยและมีผลต่อลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคน้อยมาก แต่จะช่วยเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้น

2.2 การเพิ่มเวลาในการบด จาก 24 เป็น 48 ชั่วโมง จะทำให้อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยลดลงมากกว่าและมีลักษณะเป็นทรงกลมมากขึ้น รวมทั้งจะทำให้ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป

3. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่ผ่านการเผาแล้วกับสารตั้งต้น พบว่าเมื่อบดด้วยเงื่อนไขเดียวกัน สารตั้งต้นจะมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กกว่า และลักษณะของพื้นผิวอนุภาคจะมีผิวเรียบ ผิดกับอนุภาคของวัสดุที่ผ่านการเผาแล้ว จะมีลักษณะคล้ายกับเป็นเกรนเล็กๆ เกาะกันแน่น

#### แนวทางการดำเนินการในขั้นต่อไป

การวิจัยในปัจุบันประมาณต่อไปจะเป็นการนำเอาวัสดุที่ผ่านการบดแล้วมาผสมกับวัสดุดิบตั้งต้น (Alumina A-13) โดยจะเลือกวัสดุที่ผ่านการบดโดยใช้สัดส่วนของสารต่อลูกบดเป็น 1 : 1.5 และบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยจะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. ผสมวัสดุที่ได้กับสารตั้งต้น โดยใช้อัตราส่วนดังนี้

สารตั้งต้น : วัสดุที่บดได้	100 : 0
สารตั้งต้น : วัสดุที่บดได้	75 : 25
สารตั้งต้น : วัสดุที่บดได้	50 : 50
สารตั้งต้น : วัสดุที่บดได้	25 : 75
สารตั้งต้น : วัสดุที่บดได้	0 : 100

โดยจะผสมส่วนผสมดังกล่าวให้เข้ากัน ด้วยวิธีการเดียวกับในข้อ 2.2.1

2. นำส่วนผสมที่ได้ไปผ่านเครื่อง Spray dryer เพื่อทำให้เป็นผงวัสดุแห้ง
3. อัดขึ้นรูปให้เป็นชิ้นงานด้วยเครื่อง Hydraulic press ให้เป็นชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 40x40 มิลลิเมตร
4. นำชิ้นงานบางส่วนไปทดสอบความแข็งแรงก่อนเผา (Green strength) ด้วยเครื่อง Universal testing machine
5. เผาชิ้นงานส่วนที่เหลือ โดยใช้ตารางเผาตามรูปที่ 2.1
6. ทดสอบสมบัติความแข็งแรงหลังเผา (Fired strength) ของชิ้นงาน

## เอกสารอ้างอิง

1. เล็ก อุดตมะศิริ และ สุรศักดิ์ ไททองวงศ์สกุล, “การพัฒนาจนวนหัวเทียนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์”, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 34, 30 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539, หน้า 46-53.
2. ศักดิ์สุกฤต นาคบัว และ วิชิต ประกายพรณ, “การศึกษา High Alumina ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Slip Casting ” โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2540.
3. N. Shashidhar and James S. Reeds, “Recycling Fired Porcelain”, American Ceramic Society Bulletin, Vol. 69(5), May 1990, p. 834-841.
4. D.P.H. Hasselman, “Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 52(11), November 1969, p. 600-604.
5. W.D. Kingery, “Factor Affect Thermal Stress Resistance of Ceramic Materials”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 38(1), January 1955, p. 3-15.
6. P. Somasundam, “Theories of Grinding” in “Ceramic Processing Before Firing”, G.Y. Onada and L.L. Hench (eds.), Wiley-Interscience, New York, 1978, p. 105-119.