

## **Study of Method to Grinding Fired Alumina Ceramic**

**Surasak Waitayawongskul**

**Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University**

### **Abstract**

Strength of fired ceramics is very high. To powderise for recycling needs to reduce its strength for ease grinding. In this research, alumina ceramics was used as testing material. Quenching was used to make small crack in alumina samples thereby reducing strength of the sample.

It was found that alumina samples quenched from 200°C to room temperature have about half strength of non-quenched ones. When samples were ground in ball mill by vary sample : grinding media ratio and grinding time. It is established that long grinding time has more effect on reducing particle size than increase grinding media and also gives different particle size distribution.

## **การศึกษาวิธีการบดอลูมินาเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้ว**

**สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล**

**สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

### **บทคัดย่อ**

วัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้วจะมีความแข็งแรงสูงมาก การจะบดให้เป็นผงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิธีการที่จะลดความแข็งแรงของวัสดุที่เผแล้วดังกล่าวลงเสียก่อนเพื่อให้บดง่ายขึ้น ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้อลูมินาเซรามิกเป็นวัสดุทดลอง โดยใช้วิธีการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อทำให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อวัสดุทำให้ความแข็งแรงลดลง

จากการศึกษาพบว่า การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นงานอลูมินาเซรามิกมีความแข็งแรงลดลงถึงประมาณครึ่งหนึ่งของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำชิ้นงานไปบดในหม้อบด โดยศึกษาผลของการปรับสัดส่วนวัสดุทดลองที่บดต่อลูกบดที่ใช้และเวลาในการบดที่มีต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่บดได้ พบว่า การเพิ่มปริมาณลูกบดจะช่วยลดขนาดของอนุภาคลงได้เล็กน้อยและมีผลต่อลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคน้อยมาก โดยจะช่วยให้อนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมเพิ่มมากขึ้น ส่วนการบดเป็นเวลานานขึ้นจะช่วยลดขนาดได้มากกว่าการเพิ่มปริมาณลูกบด และยังทำให้ลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคเปลี่ยนไปอีกด้วย

## คำนำ

วัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้ว (Fired ceramic) ที่มีตำหนิจนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นับเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมที่กำจัดได้ค่อนข้างยาก โดยทั่วไปแล้ว การกำจัดของเสียประเภทนี้มักจะนำไปถมที่ เพราะเป็นวิธีการที่สะดวกและประหยัดที่สุด อย่างไรก็ตามก็เป็นวิธีที่ต้องใช้พื้นที่ในการกำจัดมาก อีกทั้งยังเป็นการสูญเสียทรัพยากรไปโดยเปล่าประโยชน์อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น การนำของเสียเหล่านี้ไปถมที่ยังอาจจะก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่อพื้นดินในบริเวณที่นำไปถมด้วย ดังนั้น จึงได้มีความพยายามในการหาวิธีนำของเสียประเภทนี้กลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากของเสียเหล่านี้เป็นวัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้ว จึงเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงมาก การจะนำกลับมาใช้ใหม่ จึงต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการบดของเสียดังกล่าวให้อยู่ในรูปผงที่มีความละเอียดพอที่จะนำไปใช้งานได้เสียก่อนที่จะนำวัสดุดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ต่อไป

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการบดวัสดุอลูมินา (Alumina) ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกที่นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมายชนิดหนึ่ง ให้กลับเป็นผงละเอียดที่มีลักษณะต่างๆ ใกล้เคียงกับวัตถุดิบเริ่มต้นมากที่สุด เพื่อที่จะสามารถนำผงวัสดุที่ได้กลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก การเลือกอลูมินามาศึกษาเนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสไปในระหว่างการเผา แม้จะเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,650 องศาเซลเซียสก็ตาม (เล็ก อุตมะสิด และสุรศักดิ์ ไวทยวงษ์สกุล, 2539) ทำให้การนำผงวัสดุที่ขุดได้ไปใช้ประโยชน์จึงไม่มีความยุ่งยากมากนัก นอกจากนั้น อลูมินายังเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุเซรามิกทั่วไป ดังนั้น จึงสามารถนำวิธีการที่ใช้ในการบดวัสดุอลูมินานี้ไปใช้กับการบดวัสดุประเภทอื่นๆ ได้โดยไม่ต้องดัดแปลงกระบวนการมากนักอีกด้วย

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) ของวัสดุ

$\gamma$  คือ พลังงานในการแตกหัก (Fracture energy) ของวัสดุ

$L$  คือ ความยาวของรอยแตก

จากความสัมพันธ์ของ Griffith จะเห็นได้ว่า ถ้าหากสามารถเพิ่มความยาวของรอยแตก ( $L$ ) ได้แล้ว จะทำให้แรงที่ต้องใช้ในการแตกหักของชิ้นงานนั้นลดลงได้ วิธีการเพิ่มความยาวของรอยแตกในชิ้นงานเซรามิกมีอยู่หลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากก็คือ การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Quenching) โดยการนำวัสดุเซรามิกไปทำให้ร้อนขึ้นแล้วจึงทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว Hasselman (1969) อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า เมื่อวัสดุประเภทเซรามิกผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วนั้น พลังงานศักย์ยืดหยุ่น (Elastic Energy) ที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการแตกหัก-สร้างผิวใหม่ (Fracture-Surface Energy) และพลังงานจลน์เพื่อขยายรอยแตกออกไป เมื่อตัวอย่างถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยที่ผลต่างของอุณหภูมิมากกว่าผลต่างอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature differential,  $\Delta T_c$ ) แล้ว รอยแตกขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวที่ไม่เท่ากันของส่วนต่างๆ ในชิ้นงานจะดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นและขยายตัวออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง (Shashidhar and Reed, 1990) จากการศึกษาพบว่าค่า  $\Delta T_c$  ของวัสดุเซรามิกจะอยู่ที่ประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส

## Study of Method to Grinding Fired Alumina Ceramic.

### วิธีการทดลอง

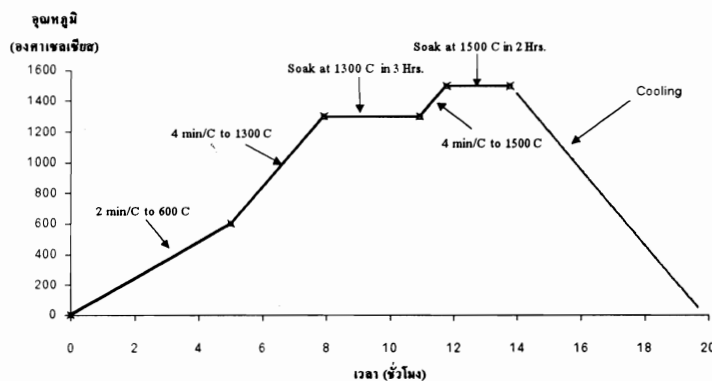
เพื่อความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงเตรียมชิ้นงานที่จะใช้เป็นของเสียขึ้นมาเองแทนการทดลองกับของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมจริงๆ โดยชิ้นงานทดสอบนี้จะเตรียมขึ้นจากผงอลูมินา A-13 ของบริษัท Alcoa ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99% และเติม MgO 0.06% ของน้ำหนักอลูมินาเพื่อเป็นตัว Sintering agent ผงวัตถุดิบจะถูกผสมให้เป็นน้ำสลิปสำหรับขึ้นรูป โดยใช้อัตราส่วนของอลูมินาต่อน้ำเท่ากับ 3:1 และเติม Displex A 40 0.36-0.4% ของน้ำหนักอลูมินาเป็นตัวช่วยในการกระจายลอยตัวและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) 1% ของน้ำหนักอลูมินาเพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียว ผสมส่วนผสมทั้งหมดในเครื่องกวนจนเข้ากันดี จากนั้นจึงปรับค่าความหนืดของน้ำสลิปให้อยู่ที่ 8-10 ก่อนจะนำไปเทในแบบปูนพลาสติกขึ้นรูปเป็นชิ้นงานลักษณะแท่งสี่เหลี่ยมด้านขนาด 2x9x1 เซนติเมตร ก่อนจะนำชิ้นงานไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำเข้าเผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียสโดยใช้ตารางการเผาตามรูปที่ 1

ชิ้นงานที่เผาแล้วจะนำไปผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 150 200 และ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนจะอบให้แห้งอีกครั้ง และนำไปทดสอบค่า Modulus of Rupture (MOR) ด้วย

เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น Instron 5583 ตามมาตรฐาน ASTM C674-88 โดยจะเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

ชิ้นงานที่ทดสอบความแข็งแรงแล้วจะถูกนำไปบดในเครื่องบดชนิดจอร์จเซอร์ (Jaw crusher) ให้เป็นผงวัสดุขนาดมิลลิเมตรก่อนจะนำไปบดต่อในหม้อบด โดยใช้ลูกบดชนิดอลูมินา ส่วนผสมที่จะบดจะมีปริมาณของแข็ง 50% และเติม Displex A 40 เล็กน้อยเพื่อช่วยในการกระจายลอยตัวของของแข็งในระหว่างการบด โดยจะใช้เงื่อนไขในการบดคือ ปริมาณสารที่จะบดต่อลูกบดที่ใช้เป็น 1:1 และ 1:1.5 โดยน้ำหนัก และเวลาในการบดเป็น 24 และ 48 ชั่วโมง นำน้ำสลิปที่ได้จากการบดไปผ่านการอบแห้งให้เป็นผงโดยใช้เครื่อง Spray Dryer ชนิดหัวพ่นจานหมุน โดยใช้อุณหภูมิอากาศเข้าและออกเป็น 250 และ 120 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ผงวัสดุที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะนำไปตรวจสอบเฟสด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น Philips PW 370 และศึกษารูปร่างของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Philips XL 30 CP ด้วยกำลังขยายตั้งแต่ 125-10,000 เท่า และนำไปวัดขนาดและลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาค (Particle Size Distribution, PSD) ด้วยเครื่องวัดอนุภาคแบบ He-Ne laser รุ่น Mastersizer S โดยทั้งหมดจะเปรียบเทียบกับผงวัตถุดิบอลูมินาตั้งต้น



รูปที่ 1 ตารางการเผาชิ้นงาน

## ผลการทดลองและวิจารณ์

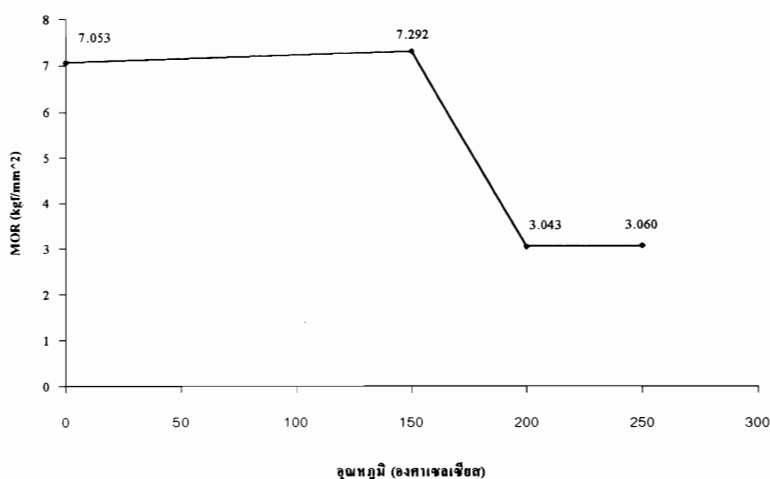
### การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน

รูปที่ 2 แสดงผลการวัดค่า MOR ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าว จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อให้อุณหภูมิเริ่มต้นในกระบวนการเย็นตัวสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส จะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิในการเริ่มต้นต่ำกว่านั้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นสูงขึ้นเป็น 250 องศาเซลเซียสกลับพบว่าความแข็งแรงของวัสดุจะไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าควรที่จะเลือกอุณหภูมิเริ่มต้นในกระบวนการเย็น

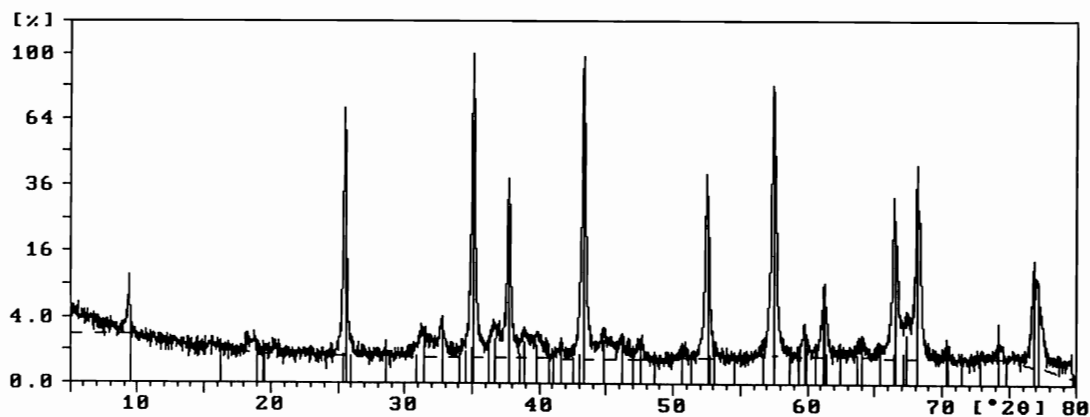
ตัวอย่างรวดเร็วที่ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยให้ความแข็งแรงลดลงมากและใช้พลังงานต่ำที่สุดในกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

### ผลการบดชิ้นงาน

รูปที่ 3 และ 4 เป็นผลการวิเคราะห์เฟสจากเครื่อง XRD ของวัตถุดิบอลูมินา A-13 และผงวัสดุที่ผ่านการเผาและบดแล้วตามลำดับ จะพบว่าทั้งสองรูปมีลักษณะเกือบจะเหมือนกันทุกประการ ประกอบไปด้วยแอลฟาอลูมินา ( $\alpha$ -alumina) เป็นเฟสหลัก และพบเฟสของทัลคัม (Talcum) เล็กน้อย ซึ่งน่าจะเกิดจากการรวมกันของอลูมินากับ MgO ที่เติมลงไปเป็น Sintering agent



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการ Quenching ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์เฟสจากเครื่อง XRD ของสารตั้งต้น อลูมินา A-13

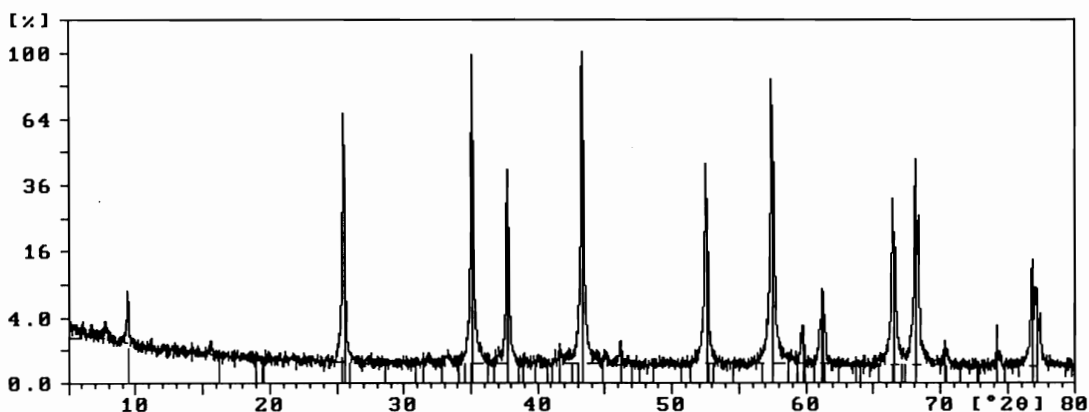
Study of Method to Grinding Fired Alumina Ceramic.

ผลการบดชิ้นงาน

ตารางที่ 1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวเฉพาะของผงตัวอย่างที่ผ่านการบดด้วยเงื่อนไขต่างๆ เทียบกับวัตถุดิบอลูมินา A-13 เริ่มต้น รูปที่ 5 ถึง 9 เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายขนาดอนุภาควัตถุดิบเริ่มต้นเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการบดเงื่อนไขต่างๆ จากตารางแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านการเผามาแล้วนั้น การเพิ่มปริมาณลูกบดจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเพิ่มเวลาในการบดซึ่งจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กลงมากกว่า และเมื่อเทียบระหว่างสารตั้งต้นกับตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านการเผา

แล้วและใช้เงื่อนไขในการบดเดียวกัน พบว่าตัวอย่างที่ 2 จะมีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่าเล็กน้อยและมีการกระจายขนาดของอนุภาคกว้างกว่า เนื่องจากการเผาจะทำให้อนุภาคเกาะกันแน่นขึ้น การบดจึงทำได้ยากกว่า

จากกราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาค พบว่าตัวอย่างที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านการเผาและนำมาบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 6 และ 7) จะมีลักษณะการกระจายตัวเกือบจะเป็นแบบเส้นโค้งมาตรฐานที่ชัดเจน ส่วนตัวอย่างที่ 3 และ 4 ซึ่งบดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะมีการกระจายขนาดในลักษณะที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นโค้งปกติอย่างชัดเจน โดยมีจำนวนอนุภาคที่มีขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก

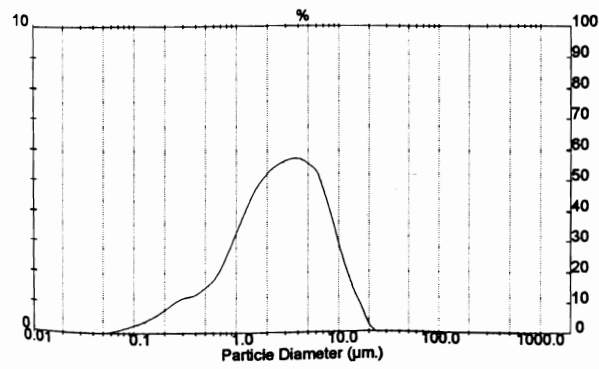


รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์เฟสจากเครื่อง XRD ของผงวัสดุที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส

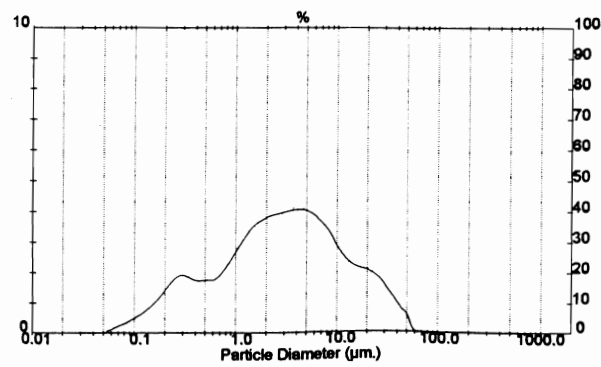
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวเฉพาะของตัวอย่างที่บดด้วยเงื่อนไขต่างๆ

ตัวอย่าง	ตัว	เงื่อนไขในการบด	ขนาดอนุภาค (µm)			พื้นที่ผิวเฉพาะ* (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	
			เฉลี่ย	เปอร์เซนไทล์ที่ 10	เปอร์เซนไทล์ที่ 50		เปอร์เซนไทล์ที่ 90
	สารตั้งต้น	สาร : ลูกบด 1:1.5 บด 24 ชม.	3.82	0.52	2.72	8.68	1.2958
1	Quenched	สาร : ลูกบด 1:1 บด 24 ชม.	6.57	0.28	2.85	18.94	1.7877
2	Quenched	สาร : ลูกบด 1:1.5 บด 24 ชม.	5.26	0.26	2.62	13.64	1.9538
3	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

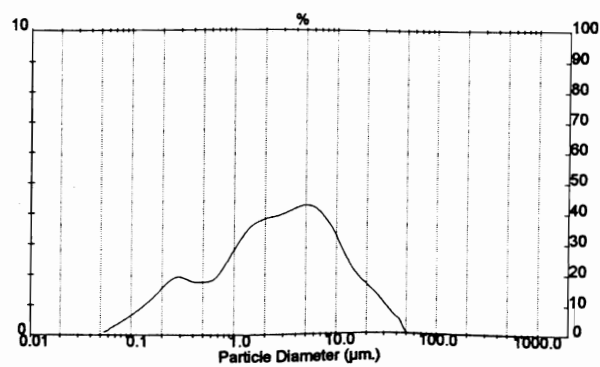
\* เป็นค่าที่คำนวณโดยคิดว่าอนุภาคทั้งหมดมีรูปร่างเป็นทรงกลม



รูปที่ 5 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นที่บดแล้ว

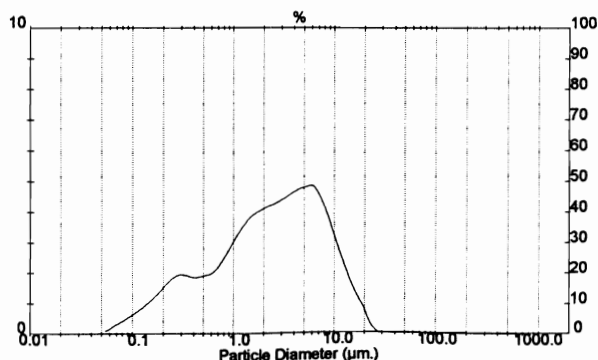


รูปที่ 6 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 1

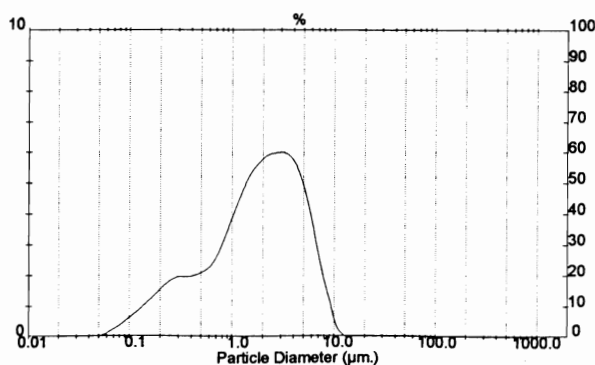


รูปที่ 7 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 2

*Study of Method to Grinding Fired Alumina Ceramic*



รูปที่ 8 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 3

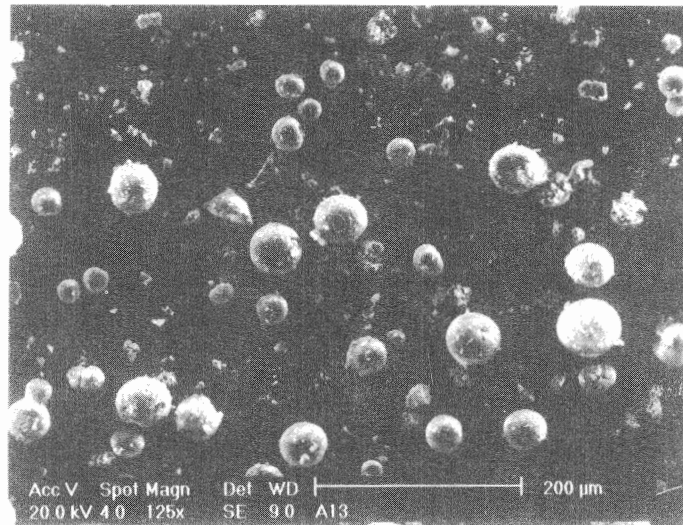


รูปที่ 9 กราฟลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ 4

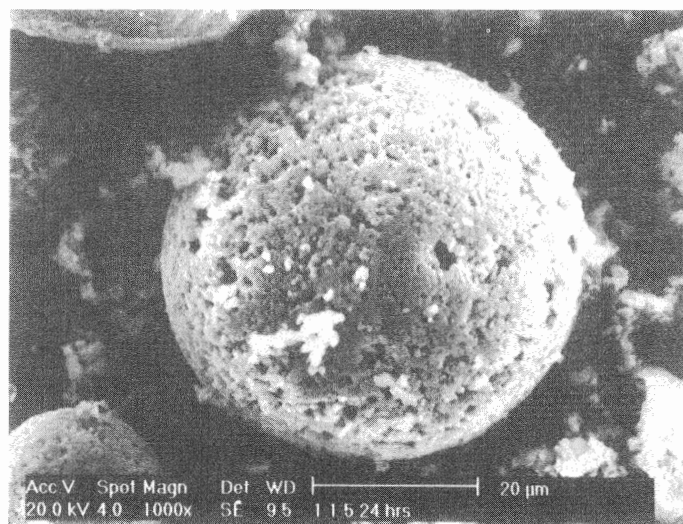
รูปที่ 10 ถึง 12 เป็นภาพถ่ายอนุภาคของสารตั้งต้น ที่ผ่านการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่กำลังขย 125, 1,000 และ 5,000 เท่าตามลำดับ จะเห็นว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะ เป็นทรงกลม มีรอยมุมเล็กๆ ตรงกลางและมีผิวค่อนข้างเรียบเป็นเนื้อเดียว

รูปที่ 13-16 เป็นภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ ที่กำลังขย 125 เท่า พบว่า ในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ 1 ซึ่งบดด้วยอัตราส่วนสารต่อลูกบด 1:1

เป็นเวลา 24 ชั่วโมงนั้น จะเห็นลักษณะอนุภาคที่มีรูปร่างเป็น ทรงกลมและเป็นก้อนไม่กลมอยู่ปะปนกัน และมีอนุภาค เล็กๆ จำนวนน้อย ในขณะที่ตัวอย่างที่ 2 (รูปที่ 14) ซึ่งบดด้วยเวลาเท่ากันแต่ใช้สัดส่วนลูกบดเพิ่มขึ้นจะมี อนุภาคทรงกลมในสัดส่วนมากกว่า ส่วนตัวอย่างที่ 3 และ 4 (รูปที่ 15-16) ซึ่งบดเป็นเวลา 48 ชั่วโมงนั้นจะมีอนุภาค ที่มีรูปร่างทรงกลมมากขึ้น และยังพบอนุภาคทรงกลม บางส่วนแตกออกแบบผ่าซีกอีกด้วย



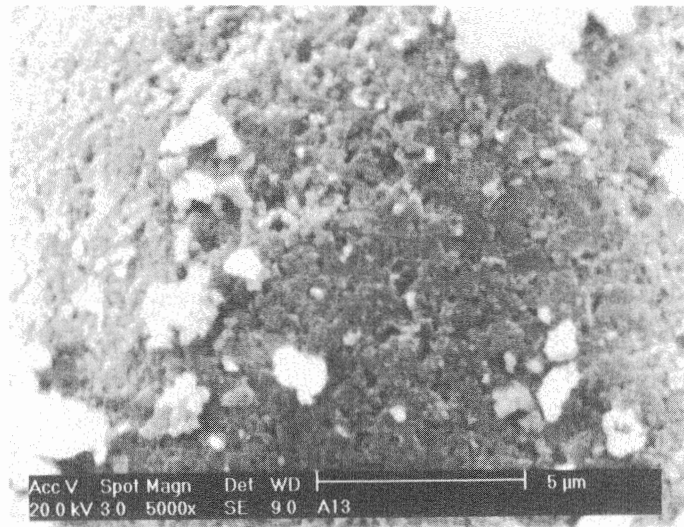
รูปที่ 10 ภาพถ่ายของอนุภาคของสารตั้งต้นที่กำลังขยาย 125 เท่า



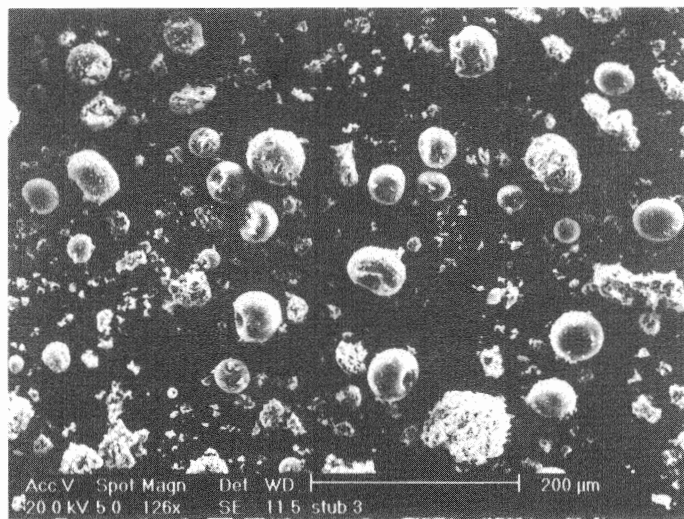
รูปที่ 11 ภาพถ่ายของอนุภาคของสารตั้งต้นที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



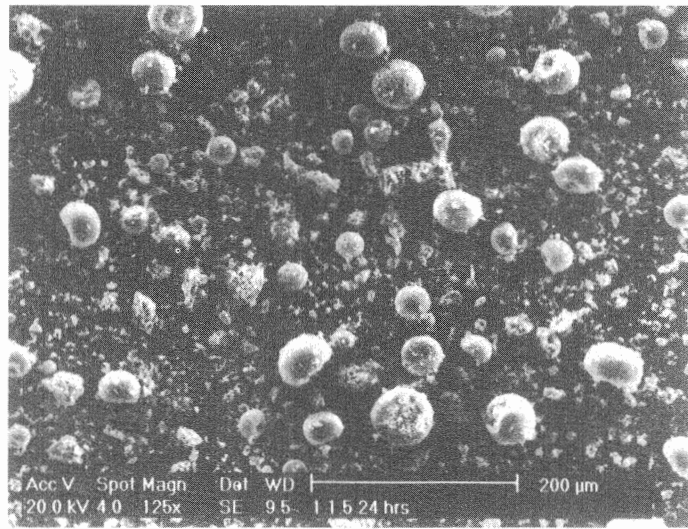
*Study of Method to Grinding Fired Alumina Ceramic.*



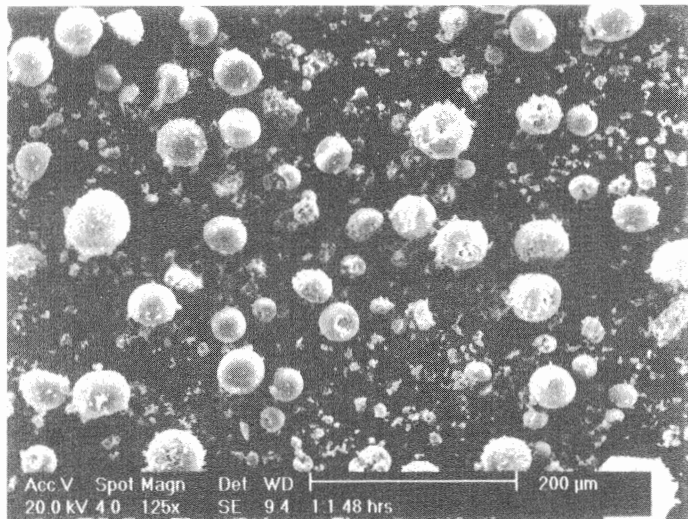
รูปที่ 12 ภาพถ่ายของอนุภาคของสารตั้งต้นที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 13 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 1 ที่กำลังขยาย 125 เท่า



รูปที่ 14 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 2 ที่กำลังขยาย 125 เท่า



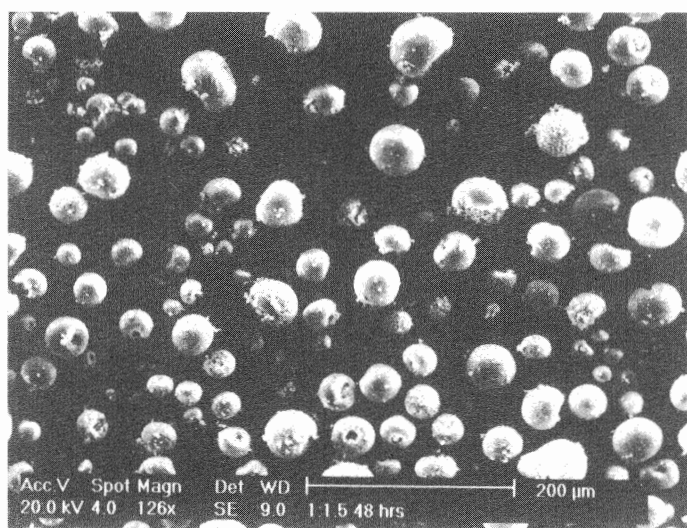
รูปที่ 15 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 3 ที่กำลังขยาย 125 เท่า

### Study of Method to Grinding Fired Alumina Ceramic.

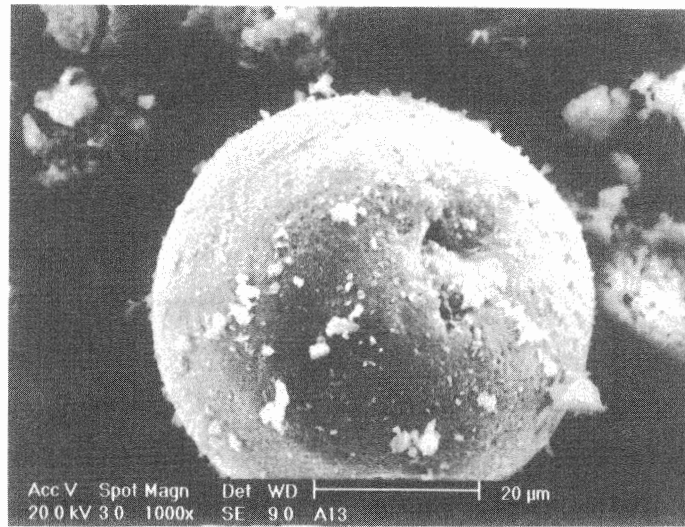
รูปที่ 17 และ 18 เป็นภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่าของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมในรูปที่ 14 จากภาพจะเห็นได้ว่าอนุภาคทรงกลมดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายกับรูปโดนัท มีรอยบุ๋มขนาดใหญ่อยู่ตรงกลางคล้ายกับในรูปที่ 12 ซึ่งเป็นอนุภาคของสารตัวอย่างที่บดด้วยเงื่อนไขเดียวกัน แต่เมื่อสังเกตลักษณะของพื้นผิวในรูปที่ 18 กลับพบว่า อนุภาคทรงกลมดังกล่าวมิได้มีผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวในรูปเดียวกันคล้ายกับรูปที่ 13 แต่จะประกอบไปด้วยเกรนเล็กๆ จำนวนมากเกาะติดกัน

รูปที่ 19 เป็นภาพถ่ายของผิวรอยแตกของชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเทียบกับรูปที่ 18 แล้ว พบว่าลักษณะของผิวอนุภาคอลูมินาที่ผ่านการบดแล้วจะมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างของชิ้นงานอลูมินา ที่เผาที่อุณหภูมิเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการบดอนุภาคไม่ได้ทำให้ลักษณะโครงสร้างเล็กๆ ภายในเปลี่ยนแปลงไป

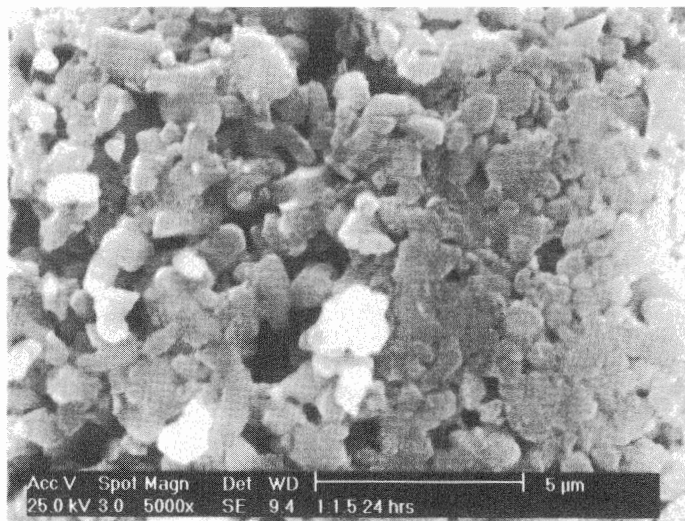
จากข้อมูลดังกล่าวอาจจะสรุปถึงกลไกในการบดได้ดังนี้ โครงสร้างของชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะเป็นเกรนเล็กๆ เกาะติดกัน เมื่อนำไปบดให้แตกด้วยเครื่องบดชนิดจอร์จเซอร์ เกรนดังกล่าวจะเกาะกันเป็นอนุภาคเล็กๆ ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน แต่เมื่อนำไปบดในหม้อบด อนุภาคดังกล่าวจะได้รับทั้งแรงเสียดสีและแรงกระแทกจากการเคลื่อนที่ของลูกบด โดยแรงเสียดสีจะทำให้เกรนเล็กๆ ที่ผิวหลุดออกไปก่อนซึ่งจะทำให้อนุภาคมีผิวที่เรียบขึ้นและมีรูปร่างเป็นทรงกลม ส่วนเกรนเล็กๆ ที่หลุดออกมาก็จะปรากฏเป็นอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากที่พบในการวัดการกระจายขนาดของอนุภาค หลังจากนั้นการกระแทกกันจะทำให้อนุภาคทรงกลมบางส่วนแตกออกแบบผ่าซีกและมีขนาดเล็กลง และเนื่องจากการเพิ่มปริมาณลูกบดและเวลาในการบดจะทำให้ความถี่ในการชนกันของอนุภาคกับลูกบดมีมากขึ้น จึงทำให้ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณลูกบดมากขึ้นและเวลานานขึ้นจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงและมีจำนวนอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้น



รูปที่ 16 ภาพถ่ายของอนุภาคตัวอย่างที่ 4 ที่กำลังขยาย 125 เท่า

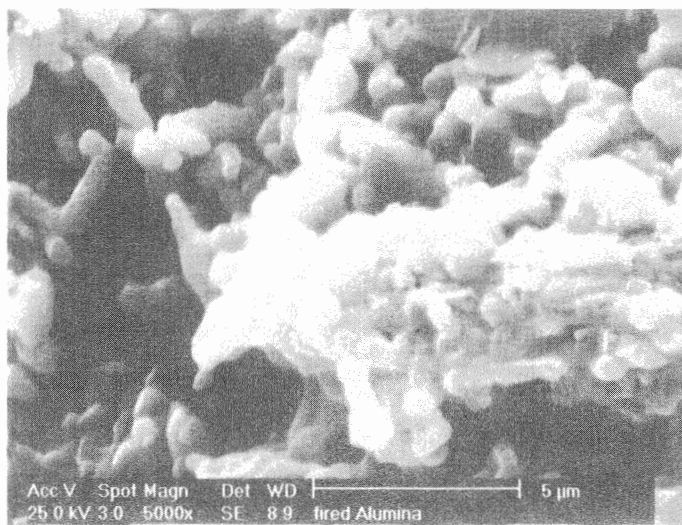


รูปที่ 17 ภาพถ่ายของอนุภาคทรงกลมในตัวอย่างที่ 2 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 18 ภาพถ่ายของอนุภาคทรงกลมในตัวอย่างที่ 2 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

## Study of Method to Grinding Fired Alumina Ceramic.



รูปที่ 19 ภาพถ่ายผิวรอยแตกของชิ้นงานอลูมินาที่เผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

### สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาวิธีการที่จะบดวัสดุอลูมินาที่ผ่านการเผาแล้วให้กลับเป็นผงวัสดุเล็กๆ ที่สามารถนำกลับไปใช้ได้ใหม่ วัสดุอลูมินาที่ผ่านการเผามีความแข็งแรงสูง การบดจึงทำได้ค่อนข้างยาก แต่สามารถลดความแข็งแรงของชิ้นงานได้โดยการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มปริมาณรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อวัสดุและทำให้ความแข็งแรงลดลง จากการทดลองพบว่า การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไปลงมาที่อุณหภูมิห้อง จะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงอย่างมากช่วยให้การบดสะดวกมากขึ้น

ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะถูกนำไปบดในเครื่องบดชนิดจอร์จเซอร์ และนำมาบดละเอียดอีกครั้งในหม้อบดชนิดบอลมิลล์ (Ball mill) โดยจะควบคุมตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ อัตราส่วนของสารที่จะบดต่อลูกบด และเวลาในการบด แล้วจึงนำสารที่บดได้ไปทำให้

เป็นผงวัสดุแห้งๆ และเปรียบเทียบลักษณะต่างๆ เทียบกันพบว่าอนุภาคที่ได้จากการบดจะมีทั้งลักษณะที่เป็นทรงกลมและไม่เป็นทรงกลม สัดส่วนระหว่างจำนวนอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและไม่เป็นทรงกลมจะขึ้นกับปริมาณของลูกบดที่ใช้และเวลาในการบด โดยปริมาณลูกบดเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยเล็กลงไม่มากนักและจะช่วยเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคทรงกลมมากขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การเพิ่มเวลาบดจะช่วยให้อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยเล็กลงกว่าเดิมและทำให้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมเกิดขึ้นมากกว่า รวมทั้งยังทำให้ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคเปลี่ยนไปจากเดิม โดยตัวอย่างที่บดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงทั้งสองตัวอย่างจะมีลักษณะการกระจายขนาดเกือบเป็นเส้นโค้งปกติ ขณะที่ตัวอย่างที่บดเป็นเวลา 48 ชั่วโมงจะมีลักษณะเบี่ยงเบนไปจากเส้นโค้งปกติอย่างชัดเจน โดยมีจำนวนอนุภาคขนาดเล็กๆ มากขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการเครือข่ายห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอลูมินา ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการเงินและวัสดุติดทดลองวัสดุอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย, คุณกฤษณา ศิริเลิศมุกด์ คุณศรีใจลด ขุนทน, คุณปริญญา พวงนาค และคุณวีระ ชูกระชั้น เพื่อนร่วมงานที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างรวมทั้ง อ.คุณฤทัย พงษ์เก่า และ อ.นฤมล สุวัฒน์นนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

### เอกสารอ้างอิง

- Hasselmann, D.P.H. 1969. Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. **52** (11) : 600-604.
- Kingery, W.D. 1955. Factor Affect Thermal Stress Resistance of Ceramic Materials. *Journal of the American Ceramic Society*. **38** (1) : 3-15.
- Shashidhar, N. and Reeds, James, S. 1990. Recycling Fired Porcelain. *American Ceramic Society Bulletin*. **69** (5) : 834-841.
- Somasundarn, P. 1978. Theories of Grinding, In : *Ceramic Processing Before Firing*. G.Y. Onada, and L.L. Hench, (eds.), New York, Wiley-Interscience : 105-119.

- เล็ก อุตตะมะสีล, และ สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล. 2539. การพัฒนาฉนวนหัวเทียนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์. *การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 34, 30 มกราคม-1 กุมภาพันธ์* : 46-53.
- ศักดิ์สุกฤต นาคบัว, และ วิจิต ปรกาศพรณ. 2540. การศึกษา High Alumina ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Slip Casting. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.