

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

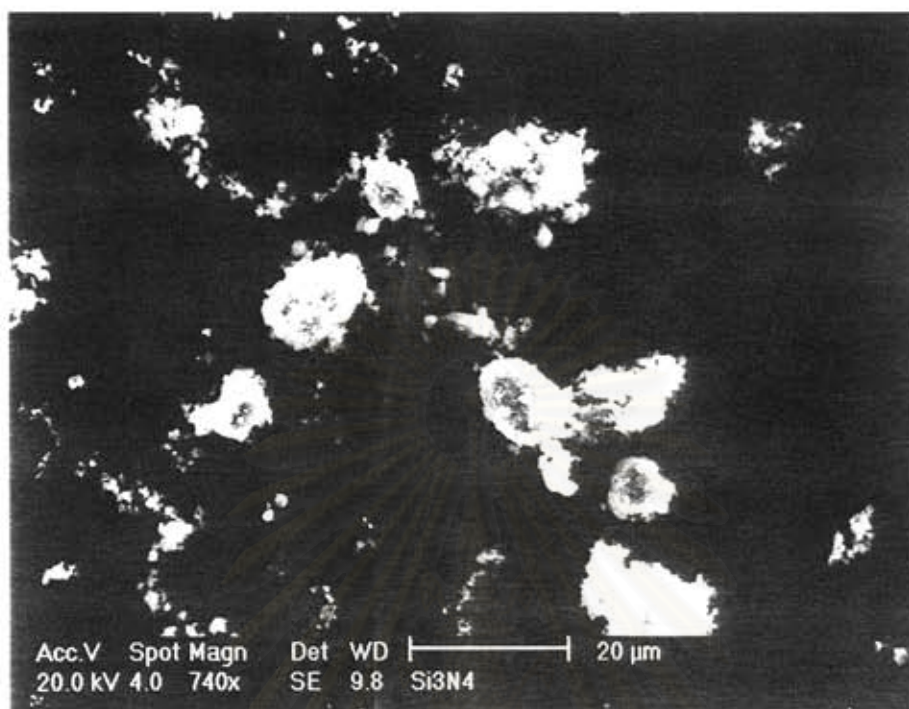
ผลการทดลองที่ทำการศึกษสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการแสดงผลของสัดส่วนของการปรับปรุงสมบัติ  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  และ  $MgO$  ต่อคุณลักษณะของเซรามิก ซิลิคอนไนไตรด์ ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปทุกทิศทางและการซินเทอริง (Sintering) ที่อุณหภูมิ  $1800\text{ }^{\circ}C$  บรรยากาศไนโตรเจนที่  $1\text{ atm}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยข้อมูลจากการทดลองจะแสดงถึงผลที่เกิดกับความหนาแน่นของซิลิคอนไนไตรด์ในแต่ละสัดส่วนของสารปรับปรุงสมบัติ ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) โดยมีการวิเคราะห์หาค่า Aspect Ratio ของเกรน  $\beta\text{-Si}_3N_4$  ค่าโมดูลัส ค่าความแข็ง (Hardness) ความต้านทานแรงดัด (Flextural Strength) และความต้านทานต่อการแตกหัก (Fracture Toughness) รวมทั้งภาพแสดงรอยแตกและผิวรอยแตกที่เกิดขึ้น

#### 4.1 ขนาดของผงเซรามิก

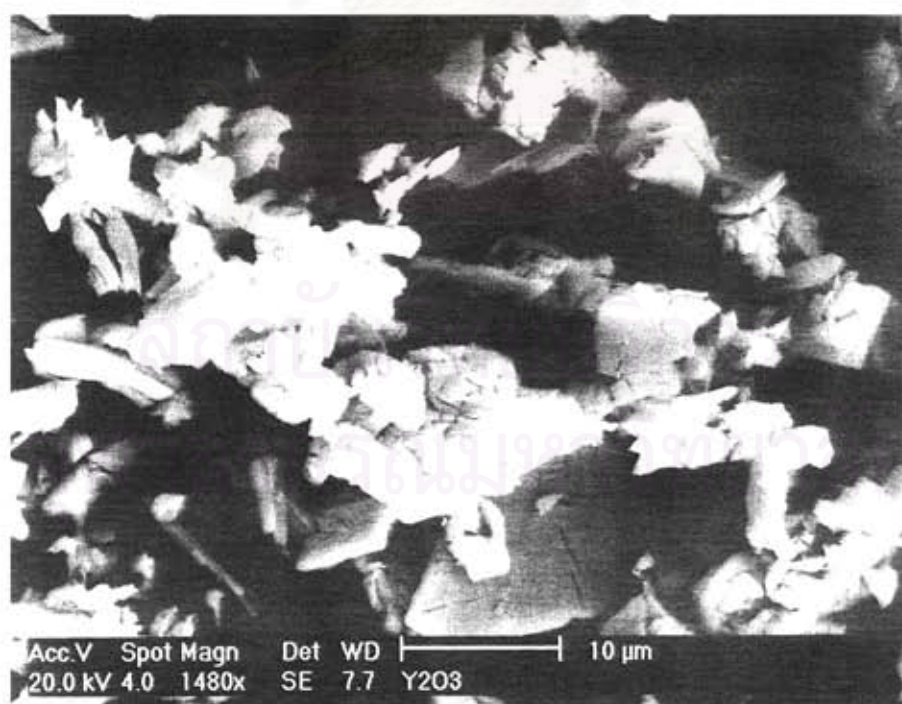
ก่อนทำการทดลองหาขนาดของสารที่ใช้เป็นดังนี้

ผงซิลิคอนไนไตรด์	มีค่าไม่เกิน	20	ไมครอน
ผงอิทเทรียมออกไซด์	มีค่าไม่เกิน	15	ไมครอน
ผงแมกนีเซียมออกไซด์	มีค่าไม่เกิน	20	ไมครอน
ผงอะลูมิเนียมออกไซด์	มีค่าไม่เกิน	1	ไมครอน

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายลักษณะวัสดุผง (a) ผงซิลิคอนไนไตรด์ (b) ผงอิทเทรียมออกไซด์ (c) ผงแมกนีเซียมออกไซด์ (d) ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อนำผงสารเหล่านี้มาบดผสมในกระบอกพลาสติกด้วยเม็ดบดเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ในสภาพเปียกเป็นเวลา 72 ชั่วโมงขนาดของผงผสมลดลงโดยมีค่าไม่เกิน 2 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.2

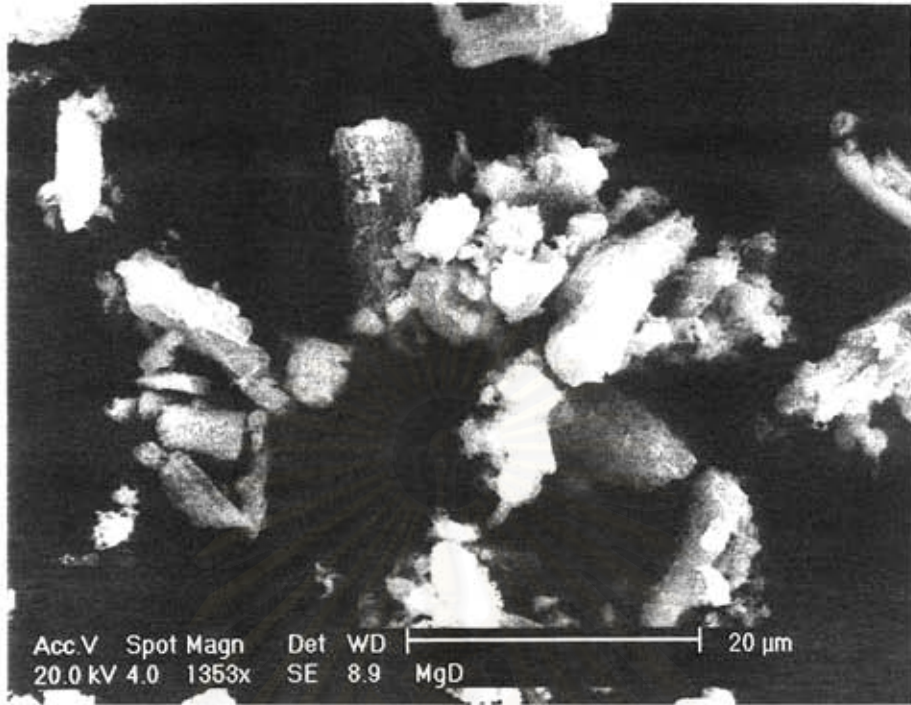


(a)

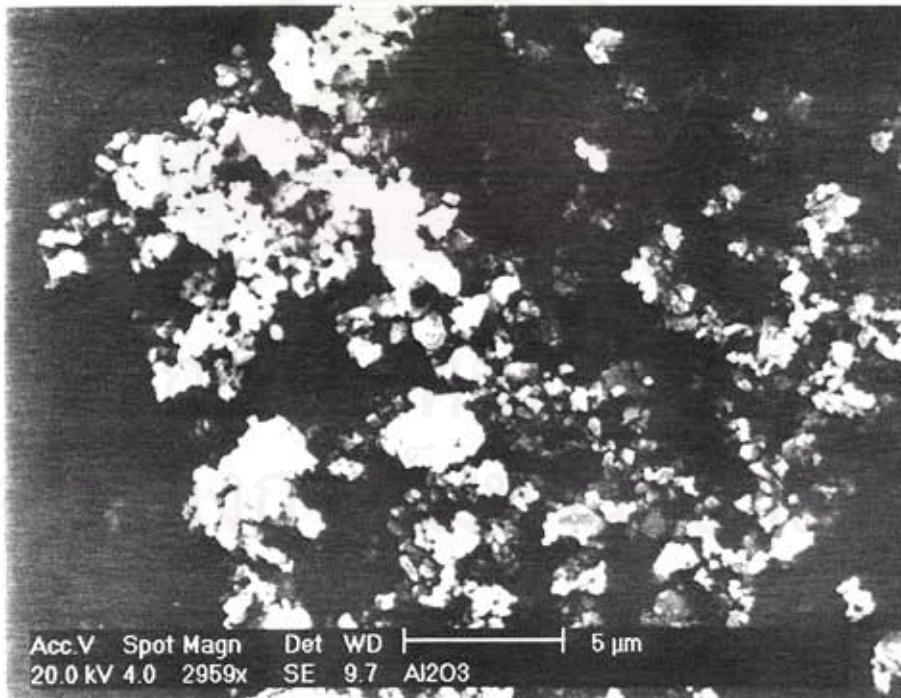


(b)

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายลักษณะวัสดุผง (a) ผงซิลิคอนไนไตรต์ (b) ผงอิทเทรียมออกไซด์

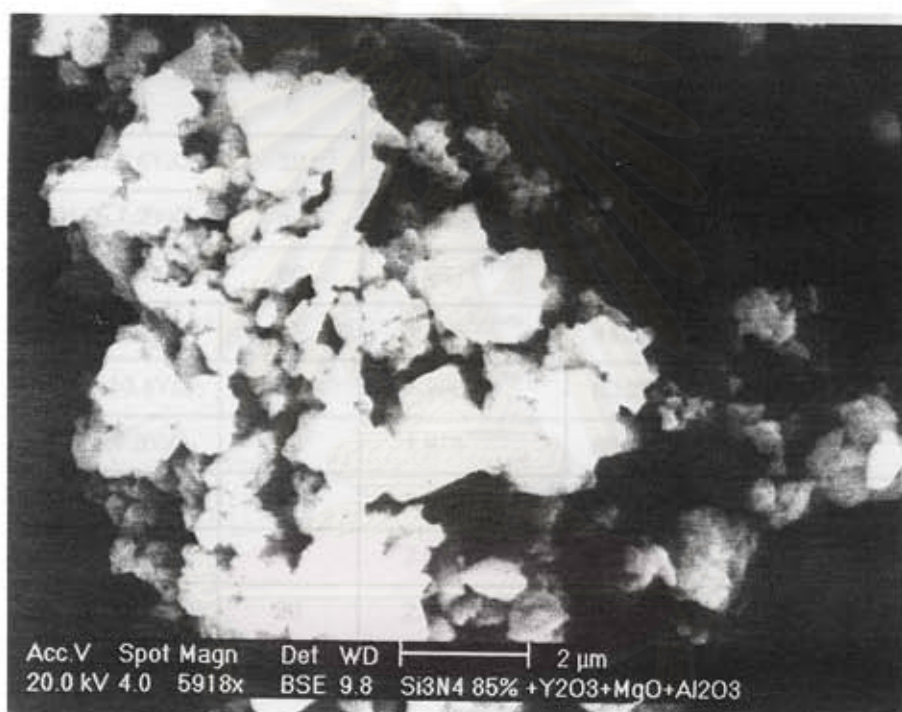


(c)



(d)

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายลักษณะวัสดุผง (c) ผงแมกนีเซียมออกไซด์ (d) ผงอะลูมิเนียมออกไซด์



## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2 แสดงขนาดของผงผสมหลังผ่านการบดนาน 72 ชั่วโมงด้วยเม็ดบดซิลิคอนไนไตรต์

#### 4.2 ความหนาแน่นของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์และการอัดแบบทุกทิศทาง (CIP) มีความหนาแน่น Green Density) ประมาณ 1.476 - 2.056 g/cm<sup>3</sup> (45-62% TD)

ความหนาแน่น ( High Density) ของชิ้นงานภายหลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1800°C ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะอยู่ในช่วง 3.142-3.275 g/cm<sup>3</sup> ( 95-99% TD) ดังตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของชิ้นงานก่อนและหลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1800°C ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สารตั้งต้น	wt%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : wt%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ความหนาแน่น ก่อนเผา (g/cm <sup>3</sup> )	%TD ก่อนเผา	ความหนาแน่น(Bulk Density)หลังเผา (g/cm <sup>3</sup> )	%TD หลังเผา
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,12Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	2.056 <sup>+/-0.009</sup>	62.19	3.250 <sup>+/-0.020</sup>	98.28
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,2.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,9.6Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	1.629 <sup>+/-0.019</sup>	49.47	3.165 <sup>+/-0.005</sup>	97.01
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,4.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	1.983 <sup>+/-0.015</sup>	60.47	3.196 <sup>+/-0.005</sup>	97.41
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,7.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,4.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	1.897 <sup>+/-0.009</sup>	58.08	3.165 <sup>+/-0.005</sup>	96.85
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,13Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	1.476 <sup>+/-0.025</sup>	44.57	3.142 <sup>+/-0.046</sup>	94.80
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,2.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,10.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	1.986 <sup>+/-0.028</sup>	60.23	3.257 <sup>+/-0.009</sup>	98.70
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,5.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	1.973 <sup>+/-0.014</sup>	60.10	3.218 <sup>+/-0.022</sup>	97.84
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,7.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	1.842 <sup>+/-0.012</sup>	56.36	3.165 <sup>+/-0.012</sup>	96.74
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,14Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	2.001 <sup>+/-0.018</sup>	60.31	3.225 <sup>+/-0.034</sup>	97.08
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,2.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,11.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	2.039 <sup>+/-0.034</sup>	61.75	3.275 <sup>+/-0.010</sup>	99.04
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,5.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,8.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	2.000 <sup>+/-0.073</sup>	60.86	3.226 <sup>+/-0.012</sup>	98.01
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,8.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.6Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	1.971 <sup>+/-0.008</sup>	60.26	3.177 <sup>+/-0.004</sup>	96.97

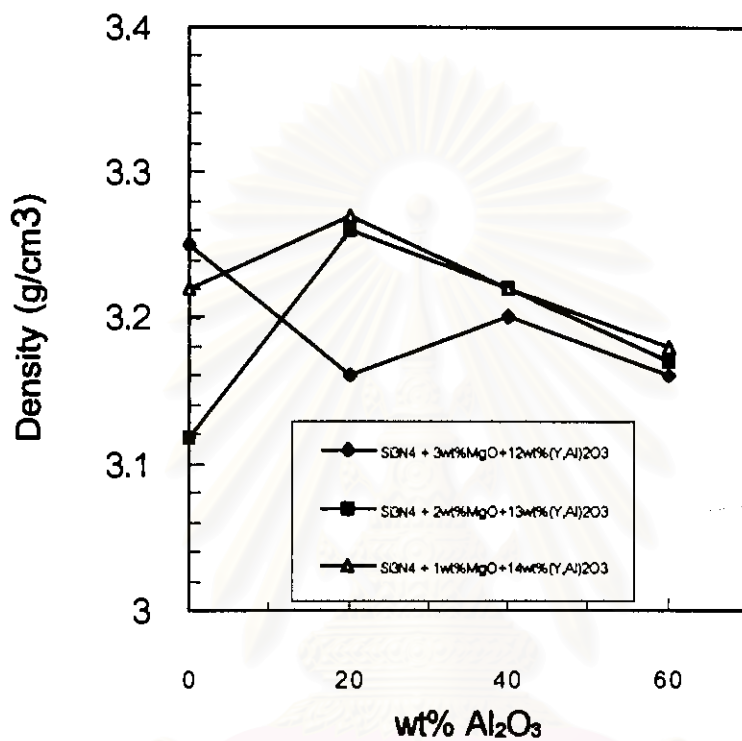
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนและหลังการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1800°C ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และความหนาแน่น(Bulk Density) ของชิ้นงานที่ผ่านการซินเทอร์แบบปราศจากแรงดันที่อุณหภูมิ  $1800^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมงใน บรรยากาศไนโตรเจน ในกรณีของชิ้นงาน  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  มีความหนาแน่น(Bulk Density)สูงสุดที่  $3.250\text{ g/cm}^3$  เมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่า  $0\text{ wt}\%$  ค่าความหนาแน่น(Bulk Density)จะค่อยๆลดลงเมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นจนถึง  $3.165\text{ g/cm}^3$  ที่  $20\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3$  และความหนาแน่น(Bulk Density)จะค่อยๆเพิ่มขึ้นถึง  $3.196\text{ g/cm}^3$  เมื่อ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ  $40\text{wt}\%$  จากนั้นความหนาแน่น(Bulk Density)มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น

สำหรับกรณีของ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 13\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  และ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  จะมีลักษณะที่คล้ายกันคือเมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก  $0\text{ wt}\%$  ถึง  $20\text{ wt}\%$  ( $2.6$  และ  $2.8\text{ g}$ ) ความหนาแน่น(Bulk Density)จะเพิ่มขึ้นจาก  $3.142\text{ g/cm}^3$  และ  $3.225\text{ g/cm}^3$  เป็น  $3.257\text{ g/cm}^3$  และ  $3.275\text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ และความหนาแน่น(Bulk Density)มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และความหนาแน่น(Bulk Density)ของชิ้นงานที่ผ่านการซินเทอร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.3 ผลทางด้านโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานทุก ส่วนผสมทางเคมี ของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์มีลักษณะเป็น Rod-Shape ของเกรน  $\beta$  ดังรูปที่ 4.4 (aถึงd) ค่า Mean Diameter อยู่ในช่วง 0.38 ถึง 0.74 ไมครอน และค่า Aspect Ratio มีค่าในช่วง 2.45 ถึง 4.02 ตามลำดับดังตารางที่ 4.2

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน กับปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  พบว่า  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  เมื่อ Mean Diameter เท่ากับ 0.62 ไมครอน ปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่า 0 wt% และค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน จะค่อยเพิ่มขึ้นๆ เมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นถึง 40 wt% ค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.68 ไมครอน หลังจากนั้น เมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น ค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน มีค่าลดลงเท่ากับ 0.51 ไมครอนที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 60 wt% กรณีของ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 13\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  Mean Diameter เท่ากับ 0.64 ไมครอน เมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่า 0 wt% และค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน จะค่อยเพิ่มขึ้นๆ เมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นถึง 20 wt% ค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.68 ไมครอน หลังจากนั้นเมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น ค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน มีค่าลดลงเท่ากับ 0.40 ไมครอนที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 40 wt% และ ค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.65 ไมครอนที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 60 wt%

ในกรณีของ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  พบว่า Mean Diameter เท่ากับ 0.53 ไมครอน เมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่า 0 wt% และค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน จะค่อยเพิ่มขึ้นๆ เมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นถึง 20 wt% ค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.74 ไมครอน หลังจากนั้นเมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น ค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เกรน มีค่าลดลงเท่ากับ 0.68 ไมครอนที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 40 wt% และเท่ากับ 0.38 ไมครอนที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 60 wt% ตามลำดับ

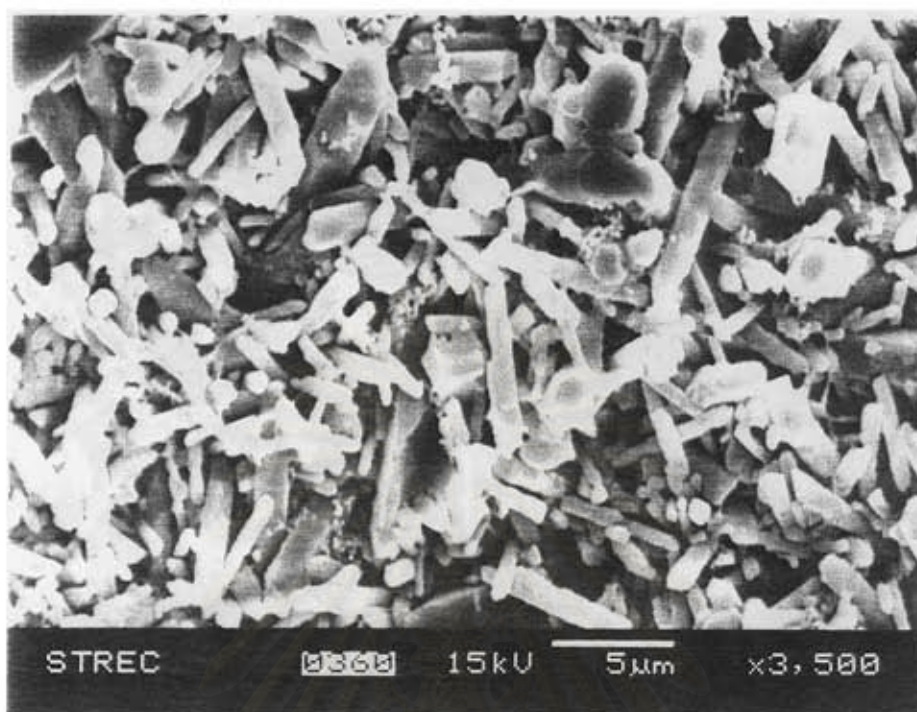
จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Aspect ratio ของ  $\beta$  เกรน กับปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  พบว่า  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 13\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  และ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  มีแนวโน้มคล้ายกันคือค่า Aspect ratio ของ  $\beta$  เกรน สูงสุดที่ปริมาณ 0 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีค่าเท่ากับ 3.85, 3.25 และ 4.02 ตามลำดับ และจะค่อยๆ ลดลง เมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นจน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 60 wt% ค่า Aspect ratio มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.55, 2.65 และ 2.50 ตามลำดับ



สารตั้งต้น	wt%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : wt%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mean Diameter (ไมครอน)	Aspect Ratio
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,12Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.62	3.85
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,2.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,9.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	0.65	2.70
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,4.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	0.68	2.60
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,7.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,4.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	0.51	2.55
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,13Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.64	3.25
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,2.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,10.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	0.68	2.6
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,5.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	0.40	2.45
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,7.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	0.65	2.65
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,14Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.53	4.02
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,2.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,11.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	0.74	2.85
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,5.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,8.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	0.68	2.65
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,8.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.6Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	0.38	2.50

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Mean Diameter และ Aspect ratio ของ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะที่เป็น Rod-Shape ของเกรน  $\beta$  ของ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\% \text{MgO} + 2.8\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 11.2\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $d = 0.74$  ไมครอน, Aspect ratio = 2.85 (b)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\% \text{MgO} + 8.4\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 5.6\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $d = 0.38$  ไมครอน, Aspect ratio = 2.5

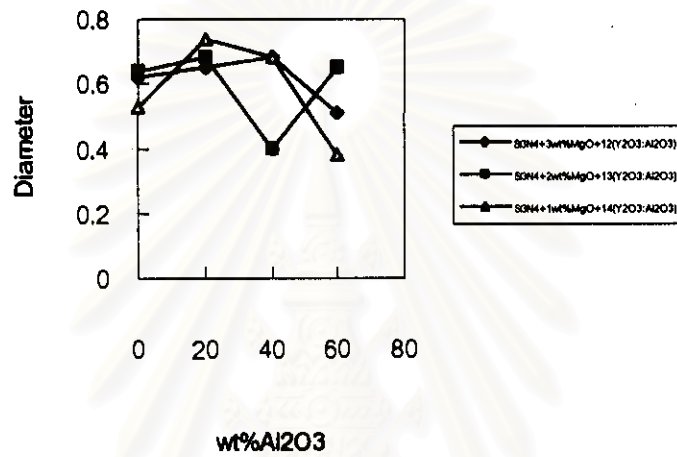


(c)

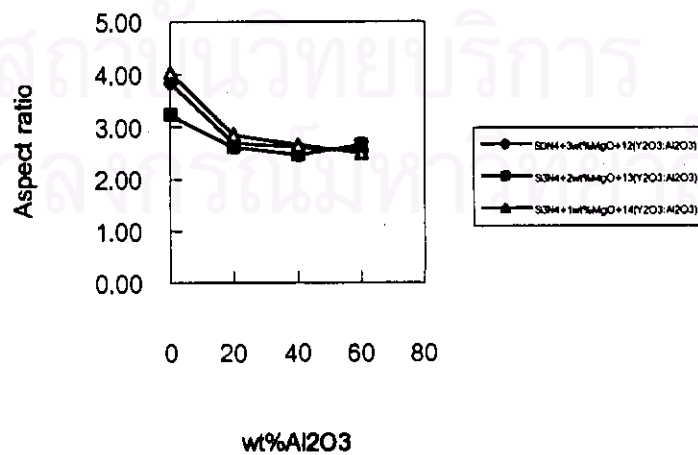


(d)

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะที่เป็น Rod-Shape ของเกรน  $\beta$  ของ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (c)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\% \text{MgO} + 12\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $d = 0.62$  ไมครอน, Aspect ratio = 3.85 (d)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\% \text{MgO} + 5.2\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 7.8\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $d = 0.40$  ไมครอน, Aspect ratio = 2.45



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mean Diameter ของ  $\beta$  เทรนกับปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Aspect ratio เฉลี่ยของ  $\beta$  เทรน กับปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

#### 4.4 คุณสมบัติทางกลของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์เป็นการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติด้าน ความแข็ง (Hardness) ยั่งโมดูลัส (Young's Modulus) ความเหนียวต่อการแตกหัก(Fracture toughness) ความต้านทานแรงดัด(Flexural strength) ของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ภายหลังการซินเทอร์

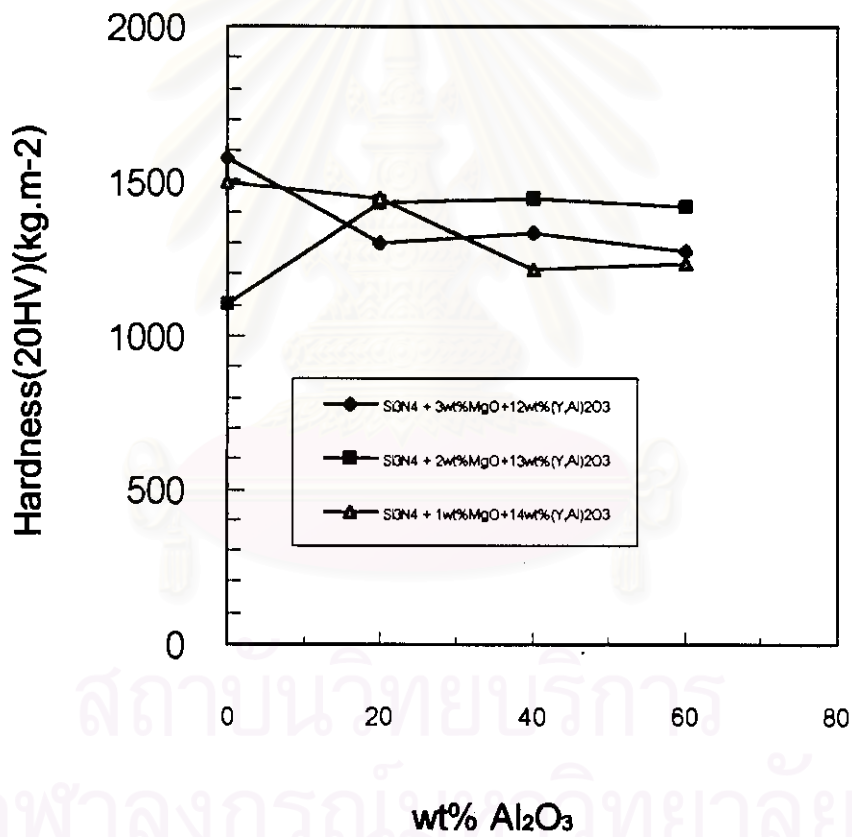
##### 4.4.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ค่าความแข็งของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 1105 ถึง 1576 kg.m<sup>-2</sup> ดังตารางที่ 4.3 จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (HV20) กับปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาแบบปราศจากแรงดันที่อุณหภูมิ 1800°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N<sub>2</sub> พบว่า Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + 3wt%MgO + 12wt% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + 2wt%MgO + 13wt% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีแนวโน้มคล้ายกันคือที่ 0wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ความแข็งมีค่าเท่ากับ 1570 และ 1497 kg.m<sup>-2</sup> ตามลำดับ เมื่อปริมาณสัดส่วน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจนถึงค่า 1275 kg.m<sup>-2</sup> และ 1420 kg.m<sup>-2</sup> ตามลำดับที่ 60wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

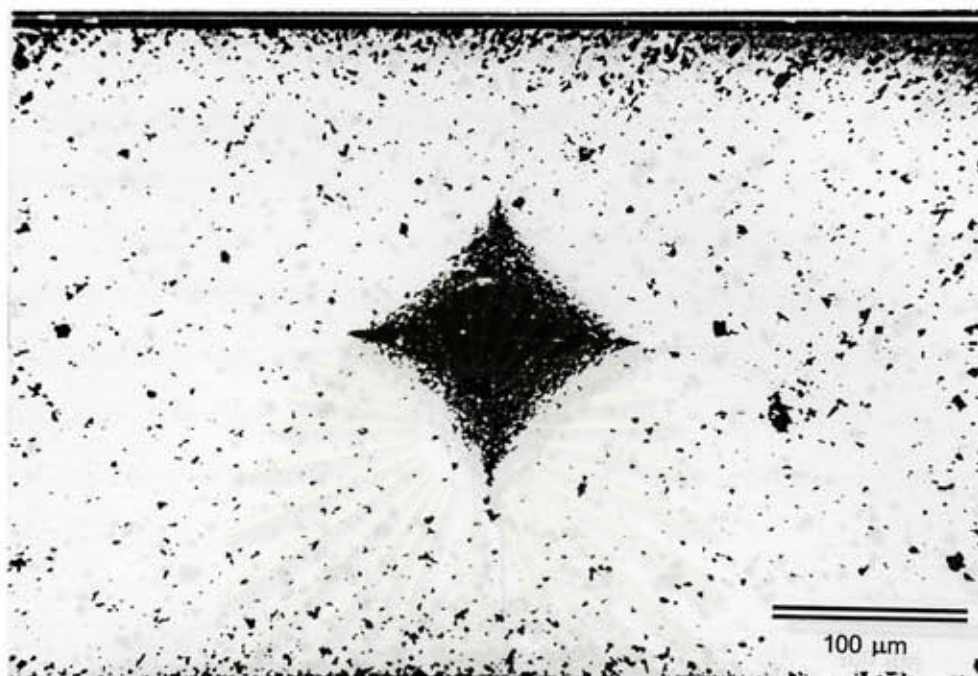
สารตั้งต้น	Hardness(HV20)( kg.m <sup>-2</sup> )
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,12Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1576 <sup>+/-50</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,2.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,9.6Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1300 <sup>+/-35</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,4.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1334 <sup>+/-17</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,7.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,4.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1275 <sup>+/-49</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,13Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1105 <sup>+/-30</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,2.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,10.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1430 <sup>+/-40</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,5.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1446 <sup>+/-22</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,7.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1420 <sup>+/-20</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,14Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1497 <sup>+/-67</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,2.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,11.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1443 <sup>+/-20</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,5.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,8.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1218 <sup>+/-12</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,8.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.6Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1237 <sup>+/-12</sup>

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่ได้จากการทดลอง

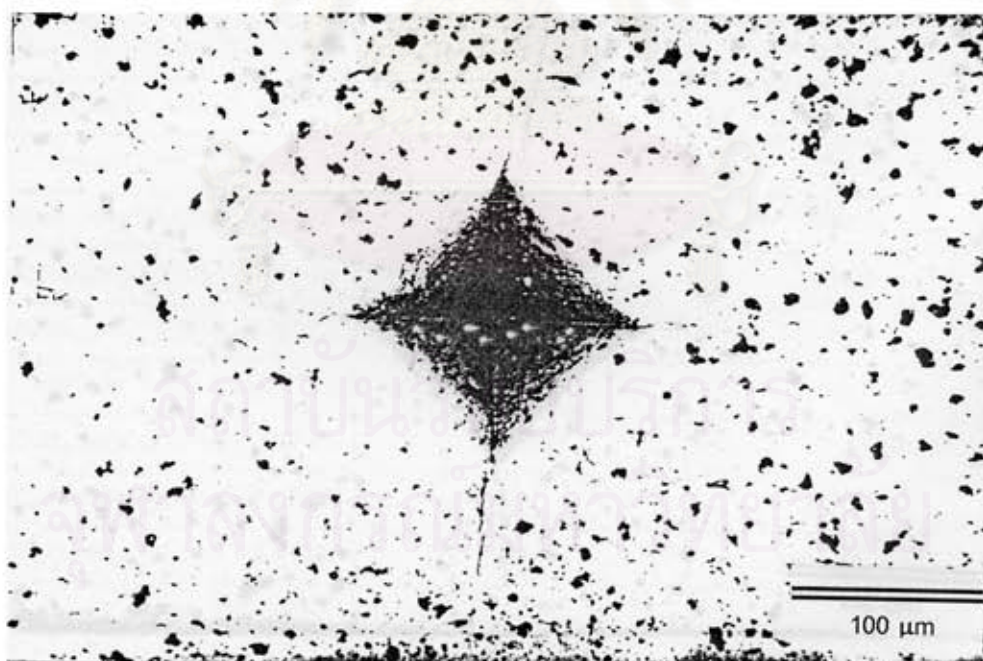
สำหรับกรณีของ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 13\text{wt}\% (\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  พบว่าที่  $0\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3$  ค่าความแข็งมีค่าต่ำเท่ากับ  $1105 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  เมื่อปริมาณสัดส่วนของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นเป็น  $20\text{wt}\%$  ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $1430 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  และค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นที่  $40\text{wt}\%$ ,  $1446 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  และเมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นที่  $60\text{wt}\%$  ค่าความแข็งลดลงเล็กน้อยเท่ากับ  $1402 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  รูปที่ 4.8 (a-d) แสดงภาพถ่ายของรอยกดเนื่องจาก Vickers Hardness Testing ที่ Load 20 กิโลกรัม



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (HV20) กับปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$

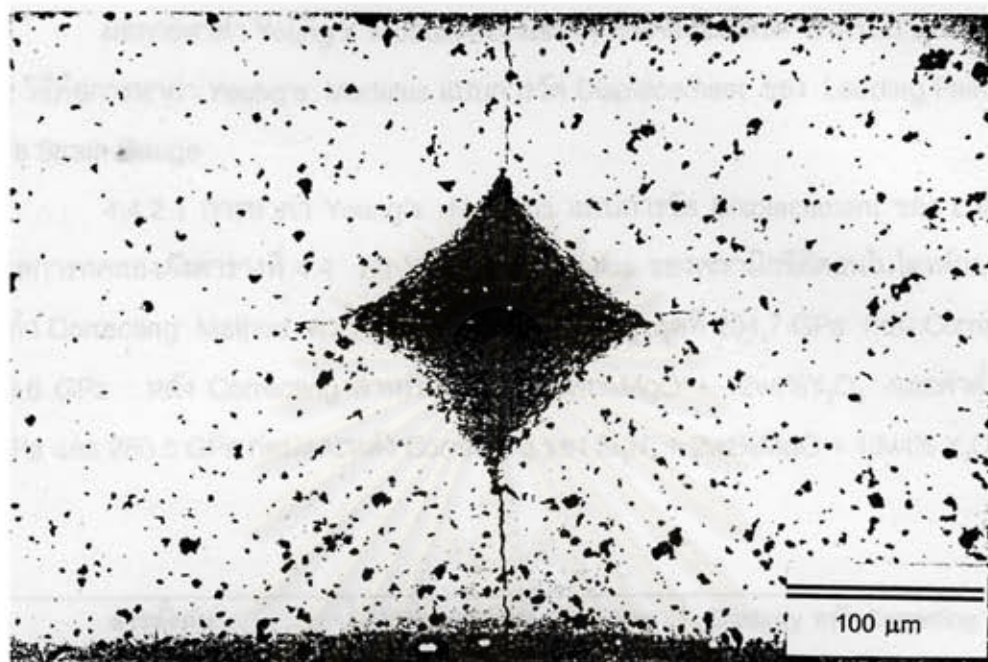


(a)

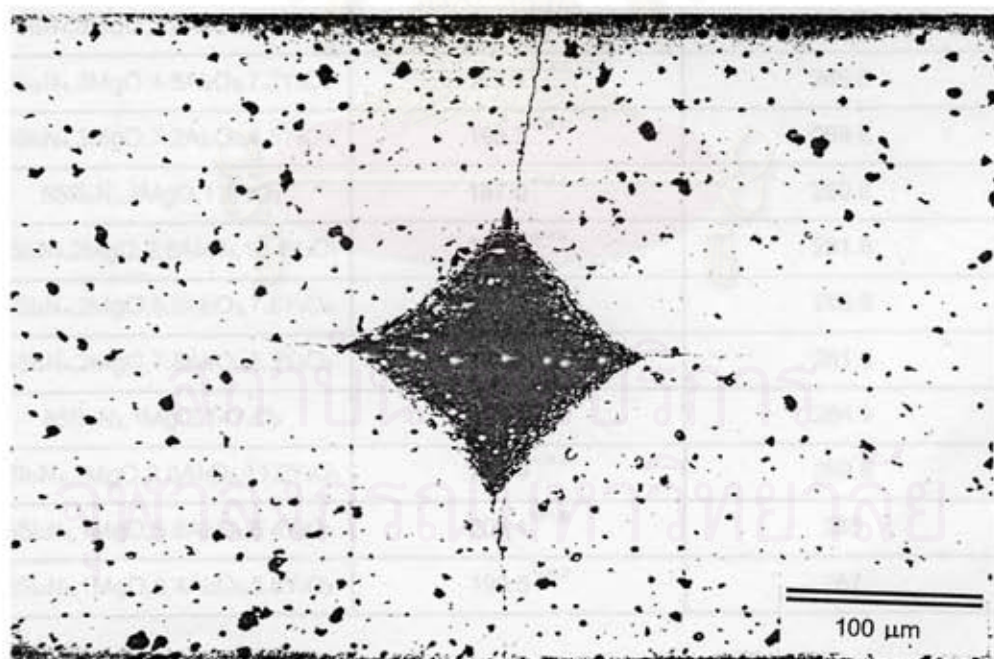


(b)

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายของรอยกดเนื่องจาก Vickers Hardness Testing ที่ Load 20 กิโลกรัม  
 (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\% \text{MgO} + 13\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $1576 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (b)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\% \text{MgO} + 14\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $1497 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$



(c)



(d)

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายของรอยกดเนื่องจาก Vickers Hardness Testing ที่ Load 20 กิโลกรัม

(c)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\% \text{MgO} + 7.2\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 4.8\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $1275 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (d)  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\% \text{MgO} + 8.4\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 5.6\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $1237 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$



#### 4.4.2 Young's Modulus

ผลการหาค่า Young's Modulus ของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ สำหรับการทดลอง ครั้งนี้มี 2 วิธีคือ การหาค่า Young's Modulus แบบการวัด Displacement ของ Loading Point และ แบบ Wire Strain Gauge

4.4.2.1 การหาค่า Young's Modulus แบบการวัด Displacement ของ Loading Point ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 ค่า Young's Modulus ของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ก่อนและ หลังการทำ Correcting Method ค่า Young's Modulus มีค่าสูงสุดที่ 204.7 GPa ก่อน Correcting และ 290.6 GPa หลัง Correcting สำหรับ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$  และค่าต่ำสุดที่ 187.0 GPa และ 260.6 GPa ก่อนและหลัง Correcting ของ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 13\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$

สารตั้งต้น	Elasticity ก่อน Correcting (GPa)	Elasticity หลัง Correcting (GPa)
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 3\text{MgO}, 12\text{Y}_2\text{O}_3$	204.7 <sup>+/-0.3</sup>	290.6
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 3\text{MgO}, 2.4\text{Al}_2\text{O}_3, 9.6\text{Y}_2\text{O}_3$	193.1 <sup>+/-7.1</sup>	261.7
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 3\text{MgO}, 4.8\text{Al}_2\text{O}_3, 7.2\text{Y}_2\text{O}_3$	197.9 <sup>+/-6.7</sup>	265.0
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 3\text{MgO}, 7.2\text{Al}_2\text{O}_3, 4.8\text{Y}_2\text{O}_3$	198.3 <sup>+/-6.7</sup>	269.6
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 2\text{MgO}, 13\text{Y}_2\text{O}_3$	187.0 <sup>+/-9.7</sup>	260.6
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 2\text{MgO}, 2.6\text{Al}_2\text{O}_3, 10.4\text{Y}_2\text{O}_3$	205.2 <sup>+/-4.9</sup>	281.8
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 2\text{MgO}, 5.2\text{Al}_2\text{O}_3, 7.8\text{Y}_2\text{O}_3$	203.9 <sup>+/-1.2</sup>	268.8
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 2\text{MgO}, 7.8\text{Al}_2\text{O}_3, 5.2\text{Y}_2\text{O}_3$	197.7 <sup>+/-2.4</sup>	261.3
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 1\text{MgO}, 14\text{Y}_2\text{O}_3$	202.7 <sup>+/-5.6</sup>	284.9
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 1\text{MgO}, 2.8\text{Al}_2\text{O}_3, 11.2\text{Y}_2\text{O}_3$	204.9 <sup>+/-3.6</sup>	282.5
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 1\text{MgO}, 5.6\text{Al}_2\text{O}_3, 8.4\text{Y}_2\text{O}_3$	203.1 <sup>+/-1.6</sup>	265
$85\text{Si}_3\text{N}_4, 1\text{MgO}, 8.4\text{Al}_2\text{O}_3, 5.6\text{Y}_2\text{O}_3$	199.5 <sup>+/-6.2</sup>	267

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าของ Young's Modulus ของ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ก่อนและหลังการทำ Correcting Method

#### 4.4.2.2 การหาค่า Young's Modulus แบบ Wire Strain Gauge

สำหรับการทดลองครั้งนี้เป็นการทดสอบหาค่า Young's Modulus ของเซรามิก ซิลิคอนไนไตรด์  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$  เพียง 1 ตัวอย่าง ค่า Young's Modulus ที่ได้มีค่าประมาณ 341 GPa

#### 4.4.3 การทดสอบความต้านทานต่อการแตกหัก

การทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักเป็นการประมาณด้วยวิธี Indentation Fracture<sup>26</sup> คือเป็นการประมาณจากรอยแตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกดแบบ Vicker's Test ที่อุณหภูมิห้อง ผลค่าเฉลี่ยของค่า  $K_{IC}$  จากการทดลองอยู่ในช่วง 4.66 ถึง 7.41  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  แสดงดังตารางที่ 4.5

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อการแตกหักกับปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  พบว่าความสัมพันธ์ของ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  และ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  ต่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือเมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นจาก 0wt% เป็น 40wt% ค่า  $K_{IC}$  ลดลงจาก 7.41 และ 6.63  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  เป็น 4.85 และ 4.86  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ตามลำดับ จากนั้นเมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นค่า  $K_{IC}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 5.74  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ที่  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 7.2\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 4.8\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$  และ 5.27  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ที่  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 7.8\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 5.2\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$

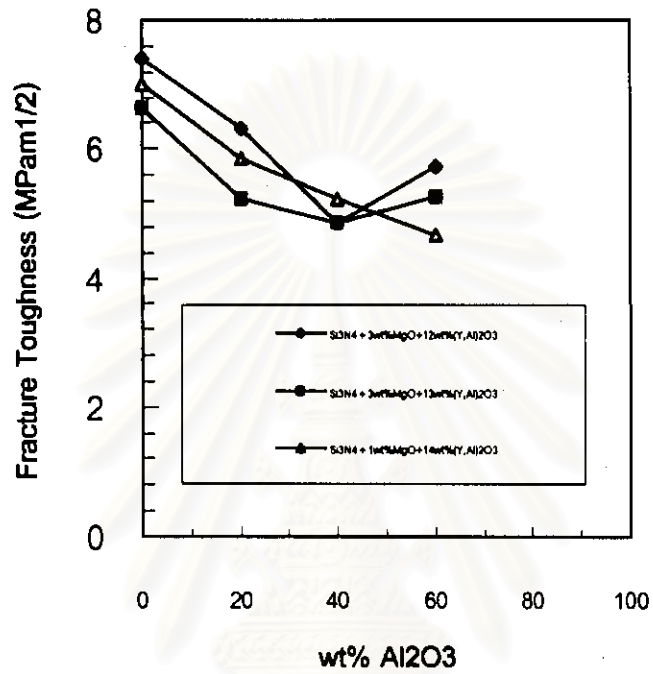
สำหรับกรณีของ  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3)$  ค่า  $K_{IC}$  สูงสุดเท่ากับ 7.00  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ที่ ปริมาณ 0wt%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  เมื่อปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นค่า  $K_{IC}$  มีแนวโน้มลดลงต่ำสุดเท่ากับ 4.66  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ที่  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 8.4\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 5.6\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารตั้งต้น	wt%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : wt%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fracture Toughness (MPa.m <sup>1/2</sup> )
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,12Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	7.41 <sup>+/-0.33</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,2.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,9.6Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	6.33 <sup>+/-0.51</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,4.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	4.85 <sup>+/-0.21</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,7.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,4.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	5.74 <sup>+/-0.58</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,13Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	6.63 <sup>+/-0.50</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,2.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,10.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	5.24 <sup>+/-0.38</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,5.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	4.86 <sup>+/-0.36</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,7.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	5.27 <sup>+/-0.26</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,14Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	7.00 <sup>+/-0.48</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,2.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,11.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	5.85 <sup>+/-0.32</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,5.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,8.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	5.23 <sup>+/-0.36</sup>
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,8.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	4.66 <sup>+/-0.20</sup>

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า K<sub>IC</sub> ที่ได้จากการทดลองแต่ละส่วนผสมของซิลิคอนไนไตรต์





รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อการแตกหักกับปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

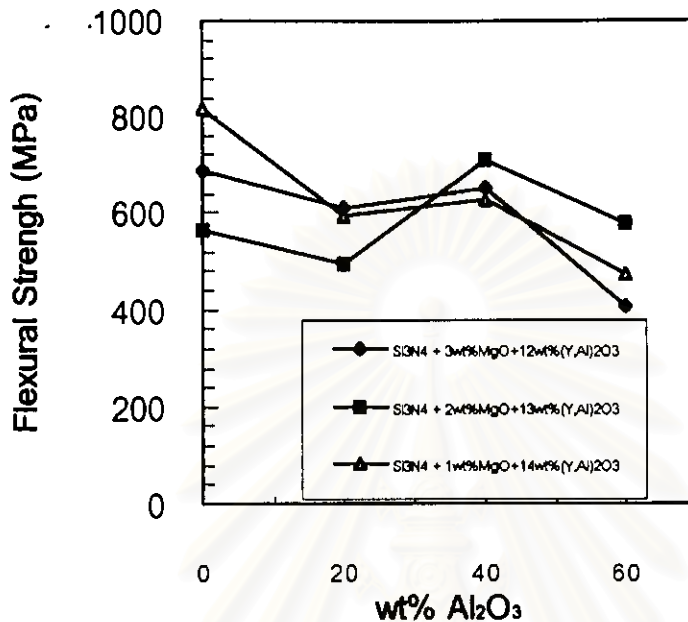
#### 4.4.4 การทดสอบความต้านทานแรงดัด ( Flexural Strength )

ค่าความต้านทานแรงดัดของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ ภายหลังจาก ซินเทอร์ ของการทดลองครั้งนี้มีค่าสูงสุดที่ 816.786 MPa และต่ำสุดที่ 405.66 MPa ดังตารางที่ 4.6 จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณ  $Al_2O_3$  กับค่าความต้านทานแรงดัดที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานภายหลังจากเผาแบบปราศจากแรงดันที่อุณหภูมิ  $1800^{\circ}C$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สารตั้งต้น	wt% $Al_2O_3$ : wt% $Y_2O_3$	Flexural Strength (MPa)	%TD
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,12Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	698.284 <sup>+/-90.402</sup>	98.28
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,2.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,9.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	609.386 <sup>+/-144.156</sup>	97.01
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,4.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	638.566 <sup>+/-58.526</sup>	97.41
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,3MgO,7.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,4.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	459.632 <sup>+/-62.091</sup>	96.85
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,13Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	564.695 <sup>+/-81.077</sup>	94.80
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,2.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,10.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	493.404 <sup>+/-493.404</sup>	98.70
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,5.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,7.8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	710.296 <sup>+/-196.544</sup>	97.84
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,2MgO,7.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	575.407 <sup>+/-63.778</sup>	96.74
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,14Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	816.786 <sup>+/-37.544</sup>	97.08
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,2.8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,11.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	594.812 <sup>+/-63.393</sup>	99.04
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,5.6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,8.4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	617.178 <sup>+/-50.973</sup>	98.01
85Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,1MgO,8.4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,5.6Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	473.173 <sup>+/-147.277</sup>	96.97

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ ภายหลังจากซินเทอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> กับค่าความต้านทานแรงดัดหลังการทำซินเทอร์

ความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดัดของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ทุก ส่วนผสมทางเคมี ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สำหรับการทดลองครั้งนี้มีความคล้ายคลึงกันคือเมื่อปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพิ่มขึ้นเป็น 20wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ค่าความต้านทานแรงดัดของ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + 3wt%MgO + 12wt%(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีค่าลดลงจาก 696.284 MPa ไปเป็น 609.386 MPa และ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + 2wt%MgO + 13wt%(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีค่าลดลงจาก 564.695 MPa ไปเป็น 493.404 MPa สำหรับ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> + 1wt%MgO + 14wt%(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีค่าลดลงจาก 816.786 MPa ไปเป็น 594.812 MPa

เมื่อปริมาณของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพิ่มขึ้นเป็น 40 wt% ค่าความต้านทานแรงดัดจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 638.566, 710.298 และ 617.178 MPa และค่าความต้านทานแรงดัดจะค่อยๆ ลดลงเมื่อปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น