

อภิปรายผลการทดลอง

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่ผ่านการซินเทอ์แบบปราศจากแรงดันในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1800°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงพบว่า

5.1 ผลด้านความหนาแน่น

การทำซินเทอ์เซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ให้ได้ความหนาแน่นสูงนอกจากการเตรียมขึ้นรูปผงที่ดีแล้ว (High Green Density) พบว่ายังมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างอื่นอีก 2 ส่วนคือส่วนที่หนึ่งมาจากขนาดของผงซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่งปกติจะมีชั้นซิลิกาเคลือบที่ผิวประมาณ 1 ถึง 5 wt% ส่วนที่สองคือคุณสมบัติของ เฟสแก้ว (Glass Phase) ที่เกิดจากสารปรับปรุงสมบัติเพื่อช่วยการซินเทอ์ เช่น Softening Temperature และความหนืด (Viscosity)¹³

จากตารางที่ 5.1 แสดงส่วนผสมของสารปรับปรุงสมบัติกับ %TD เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่าง wt%Al₂O₃ กับ wt%MgO ของส่วนผสมทางเคมีของ A ถึง M เปรียบเทียบกับเฟสไดอะแกรมของระบบ MgO-Al₂O₃-SiO₂³³ ดังรูปที่ 5.1 เมื่อลากเส้นตรงจากจุด 100wt%SiO₂ ไปยังจุดที่อยู่บนเส้น 0wt%SiO₂ ตำแหน่ง A ถึง M (0 – 89.36 wt% Al₂O₃ : MgO) ตามลำดับ พบว่าเส้นตรงที่ลากไปยังตำแหน่ง B (44.44 wt% Al₂O₃) และ F (56.52 wt% Al₂O₃) ผ่านจุด Liquid Phase Transformation ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 1400°C ในระบบ MgO-Al₂O₃-SiO₂

สำหรับส่วนผสมทางเคมีของ A ถึง M เปรียบเทียบกับเฟสไดอะแกรมของระบบ Al₂O₃-Y₂O₃-SiO₂¹⁸ ดังรูปที่ 5.2 พบว่าเมื่อลากเส้นตรงจากจุด 100wt%SiO₂ ไปยังจุดที่อยู่บนเส้น 0wt%SiO₂ ตำแหน่ง A ถึง M (0 – 60 wt% Al₂O₃ : Y₂O₃) ตามลำดับ ผลปรากฏว่าเส้นตรงที่ลากไปยังตำแหน่ง C, G และ L (40 wt% Al₂O₃) ผ่านจุด Liquid Phase Transformation ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 1400°C ในระบบ Al₂O₃-Y₂O₃-SiO₂

ด้วยเหตุผลดังกล่าวเมื่อทำการซินเทอ์ที่อุณหภูมิ 1800°C เฟสแก้วที่เกิดจากส่วนผสมของสารปรับปรุงสมบัติ B, C, F, G และ L จะมีความหนืดต่ำ (Low Viscosity) ทำให้ผงซิลิคอนไนไตรด์ เกิดปรากฏการณ์ Wettability ได้ดี เป็นผลให้ขั้นตอนการจัดเรียงอนุภาค (Rearrangement)

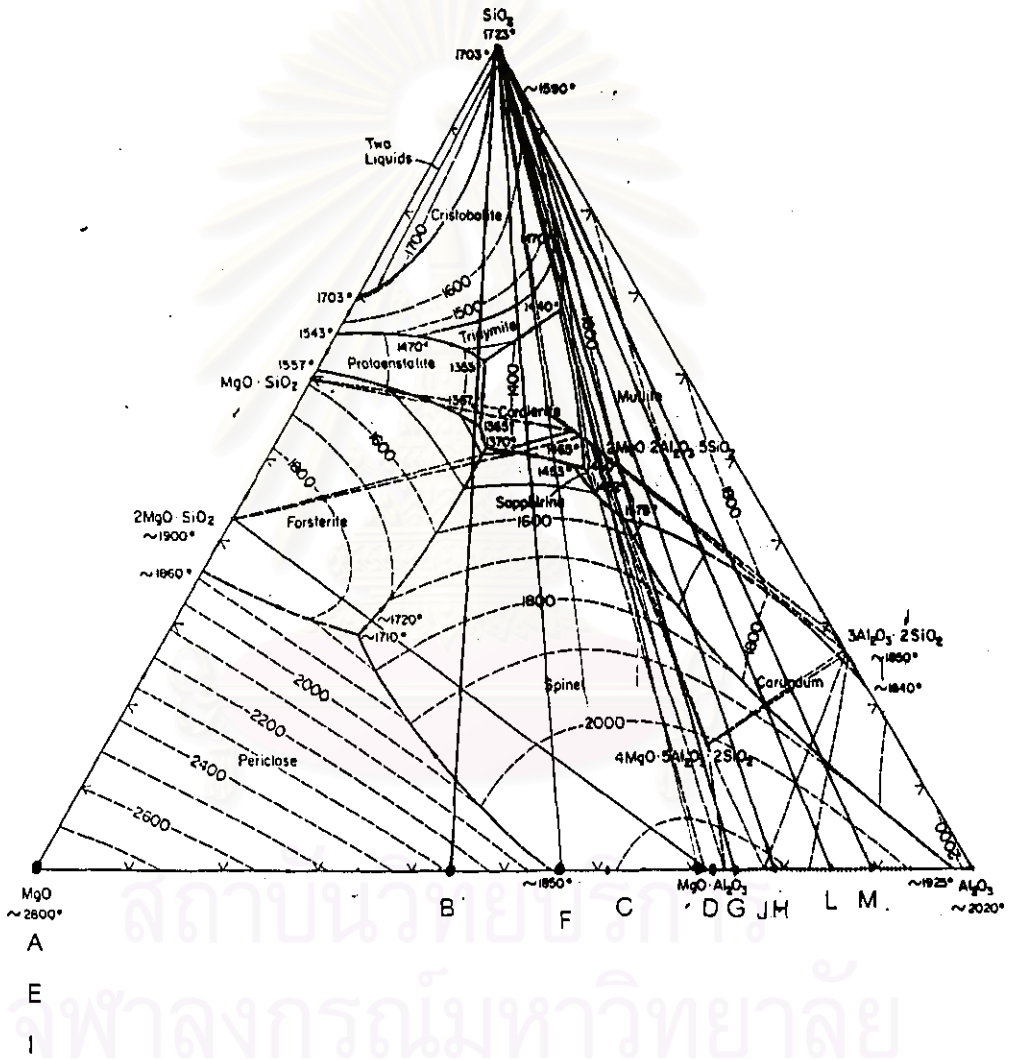
เนื่องจากแรง Capillary และขั้นตอนการ Solution-Diffusion-Precipitation ของกระบวนการซินเทอร์ เกิดขึ้นได้ดีและทำให้เซรามิกซิลิคอนไนไตรต์ภายหลังการทำซินเทอร์มีความหนาแน่นสูง

ที่สัดส่วนของ $1 \text{ wt\%MgO} + 2.8\text{wt\%Al}_2\text{O}_3 + 11.2\text{wt\%Y}_2\text{O}_3$ มีความเป็นไปได้ที่จะเป็น Eutectic Temperature ของระบบ $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ เนื่องจากความหนาแน่นที่ได้นั้นมีค่าสูงสุด

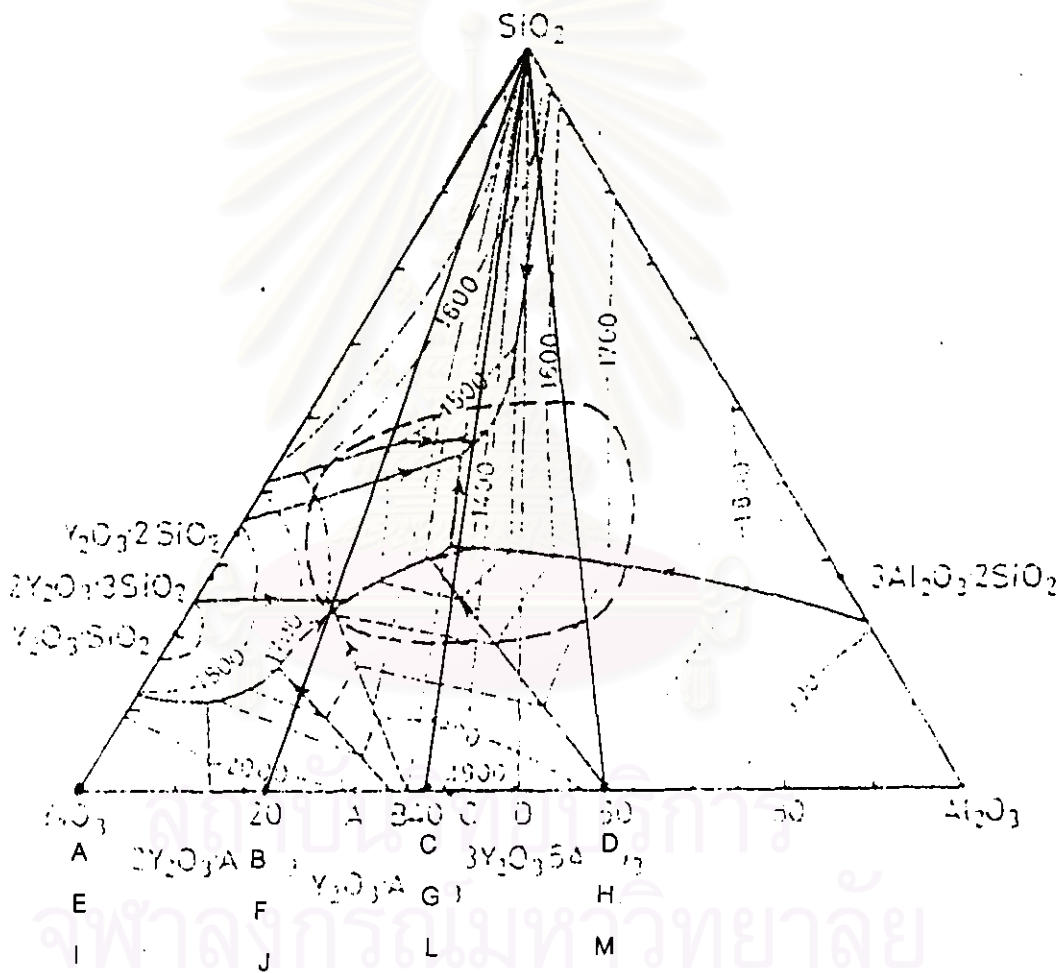
สำหรับกรณีของส่วนผสม B ที่มีผลด้านความหนาแน่นประมาณ 97.04 %TD อาจเนื่องมาจากการเตรียมผงขึ้นรูป (Green density) ไม่ดีพอ ซึ่งค่าความหนาแน่นก่อนการซินเทอร์ (Green Density) ที่ได้มีค่าต่ำประมาณ 1.629 g/cm^3 , 50%TD

สารปรับปรุง สมบัติ Composition	MgO (g)	Al ₂ O ₃ (g)	Y ₂ O ₃ (g)	Wt%Al ₂ O ₃ ต่อ MgO	wt%Al ₂ O ₃ ต่อ Y ₂ O ₃	%TD
A	3	-	12	0	0	98.28
B	3	2.4	9.6	44.44	20	97.01
C	3	4.8	7.2	61.54	40	97.41
D	3	7.2	4.8	70.59	60	96.85
E	2	-	13	0	0	94.80
F	2	2.6	10.4	56.52	20	98.70
G	2	5.2	7.8	72.22	40	97.84
H	2	7.8	5.2	79.59	60	96.74
I	1	-	14	0	0	97.08
J	1	2.8	11.2	73.68	20	99.04
L	1	5.6	8.4	84.85	40	98.01
M	1	8.4	5.6	89.36	60	96.97

ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณสารปรับปรุงสมบัติที่ทำให้ความหนาแน่น%TD ภายหลังการทำซินเทอร์

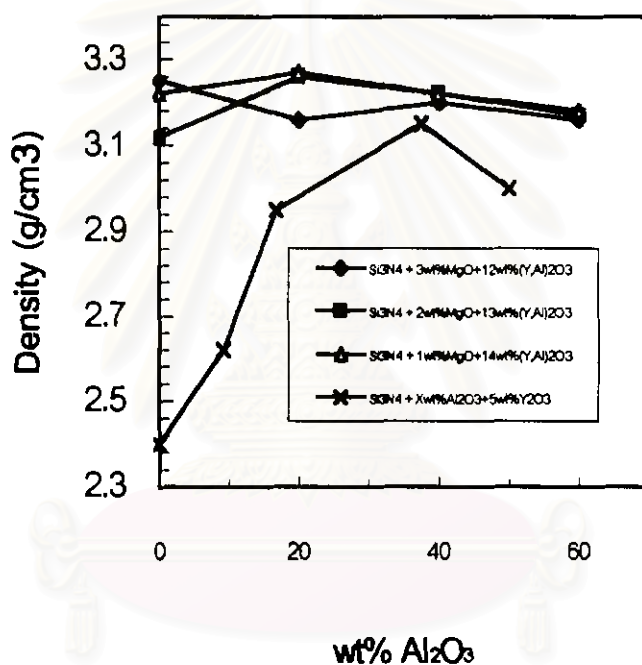


รูปที่ 5.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของ ระบบ $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ ³³



รูปที่ 5.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ Al_2O_3 - Y_2O_3 - SiO_2 ¹⁸

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 13\text{wt}\% (\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Y}_2\text{O}_3)$ และ $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\% (\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Y}_2\text{O}_3)$ กับผลการทดลองของ Eiji Tani และผู้ร่วมงาน⁸ ในการทำซินเทอร์ $\text{Si}_3\text{N}_4 + 5\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3 + X\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิ 1800°C ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ความดัน 2 MPa ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น(Bulk Density)กับปริมาณ Al_2O_3 มีแนวโน้มคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น(Bulk Density)กับปริมาณ Al_2O_3 กับผลงานของ Eiji Tani และผู้ร่วมงาน⁸



5.2 ผลด้าน Young's Modulus of Elasticity (E)

ผลการทดสอบหาค่า Young's Modulus ด้วย Three Point Bending ของ $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$ พบว่าการทดสอบแบบ Strain Gauge Wire มีค่ามากกว่าวิธีการวัด Point Load Displacement ประมาณ 10% ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในขณะที่ชิ้นงานถูก Bending บริเวณที่มีการยืดตัวมากที่สุดคือบริเวณด้านล่างตรงกลางของชิ้นงาน ดังนั้นการใช้ Wire strain gauge วัดค่าการยืดตัวได้ถูกต้องที่สุดควรจะต้องใช้ลวดที่มีความยาวน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ด้วยสาเหตุนี้การใช้ Wire strain gauge ที่มีความยาว 10 mm อาจมีผลทำให้ค่าที่อ่านได้จาก Strain Gauge มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ทำให้ผลการคำนวณค่า Young's Modulus มีค่าสูง จาก JIS R 1602 ได้แนะนำให้ใช้ Wire Strain Gauge 1 mm หรือน้อยกว่า ในกรณีของ Three Point Bending ติดที่ด้านล่างตรงกลางของชิ้นงานที่ทำการทดสอบ

จากรูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic กับ Relative density พบว่าค่า Elastic มีแนวโน้มแปรผันตรงกับ Relative density แสดงว่าปัจจัยที่อิทธิพลต่อค่า Elastic modulus ของ Si_3N_4 คือความหนาแน่น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ O. Yeheskel และ Y. Gefen³³ ที่เสนอวิธีการหาค่า Elastic modulus ของ Si_3N_4 ในช่วง Porosity 0 ถึง 50%

จากสมการ
$$E_{\text{Si}_3\text{N}_4} = C_{\alpha/(\alpha+\beta)} E_{\alpha} (1 - 2.0P) + C_{\beta/(\alpha+\beta)} E_{\beta} (1 - 3.3P)$$

โดยที่ $E_{\alpha} = 362 \text{ GPa}$ และ $E_{\beta} = 312 \text{ GPa}$

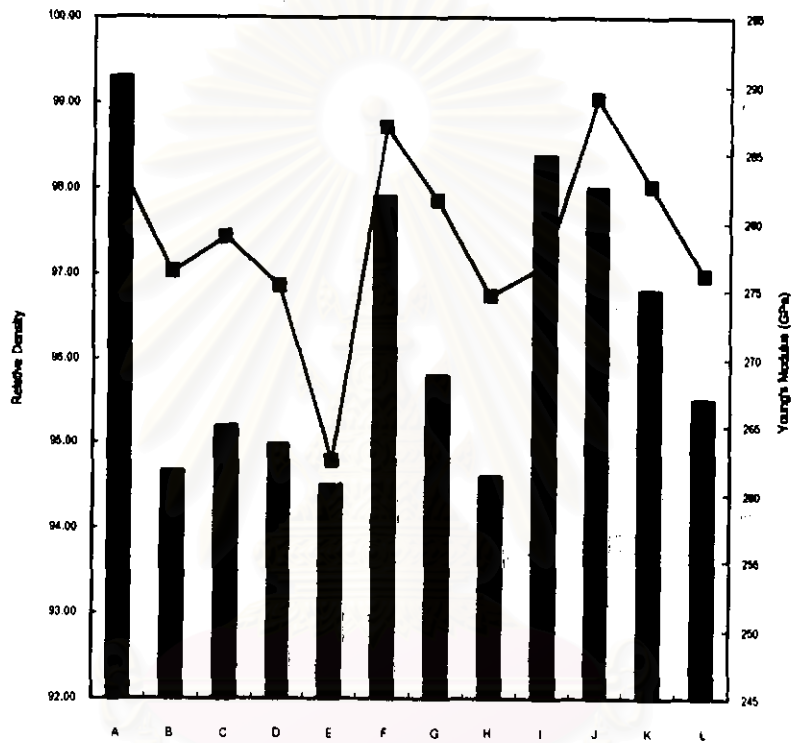
สำหรับในกรณีของ ส่วนผสม C ที่มีค่า Elastic สูงถึง 265 GPa ในขณะที่ %TD ต่ำเท่ากับ 94.71 อาจเนื่องมาจากเฟสแก้ว (Secondary phase) ที่มีปริมาณสูงของ Y_2O_3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์	ส่วนผสมทางเคมี	Young's Modulus (GPa)	%TD
A	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,12Y ₂ O ₃	290.6	98.28
B	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,2.4Al ₂ O ₃ ,9.6Y ₂ O ₃	261.7	97.01
C	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,4.8Al ₂ O ₃ ,7.2Y ₂ O ₃	265	97.41
D	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,7.2Al ₂ O ₃ ,4.8Y ₂ O ₃	263.6	96.85
E	85Si ₃ N ₄ ,2MgO,13Y ₂ O ₃	260.6	94.80
F	85Si ₃ N ₄ ,2MgO,2.6Al ₂ O ₃ ,10.4Y ₂ O ₃	281.8	98.70
G	65Si ₃ N ₄ ,2MgO,5.2Al ₂ O ₃ ,7.8Y ₂ O ₃	268.8	97.84
H	85Si ₃ N ₄ ,2MgO,7.8Al ₂ O ₃ ,5.2Y ₂ O ₃	261.3	96.74
I	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,14Y ₂ O ₃	284.9	97.08
J	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,2.8Al ₂ O ₃ ,11.2Y ₂ O ₃	282.5	99.04
K	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,5.6Al ₂ O ₃ ,8.4Y ₂ O ₃	275	98.01
L	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,8.4Al ₂ O ₃ ,5.6Y ₂ O ₃	267	96.97

ตารางที่ 5.2 แสดงค่า Young's Modulus กับ Relative density

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (■) Young's Modulus กับ (—■—) Relative density

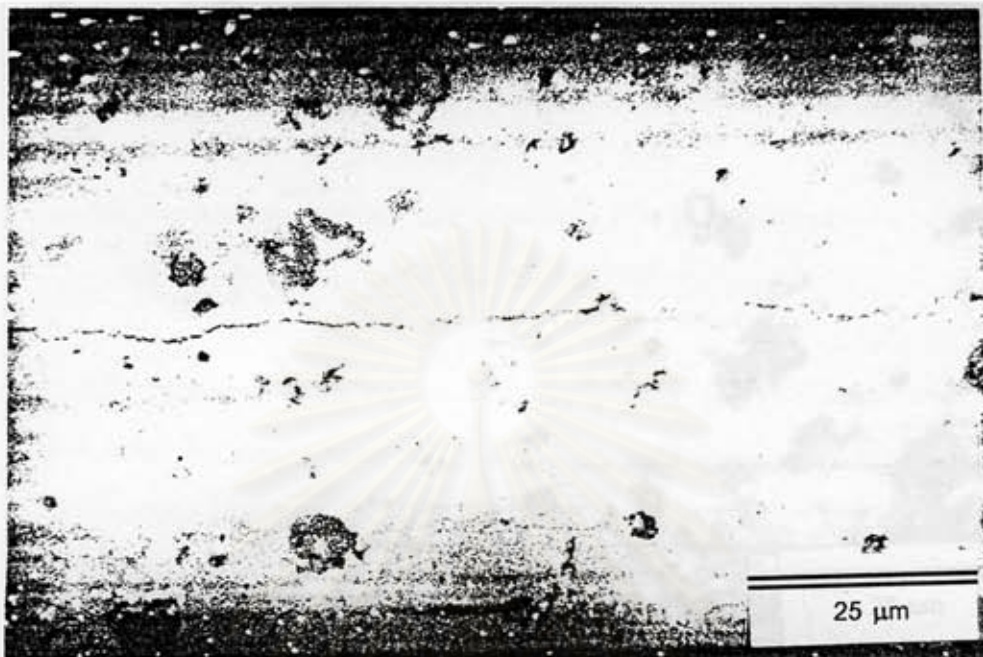
5.3 ผลด้านความต้านทานการแตกหัก

ผลจากความแตกต่างของสัดส่วนสารปรับปรุงสมบัติ ส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของซิลิคอนไนไตรด์มีรูปร่างแตกต่างกันแสดงให้เห็ดังรูปที่ 4.4 (a-d) มีการตกผลึกเกิดเฟสใหม่เป็น β - Si_3N_4 จากอนุภาค α - Si_3N_4 ซึ่งมีลักษณะเป็นเกรนยาว ลักษณะของเกรนดังกล่าวมีคุณสมบัติเบี่ยงเบนรอยแตก (Deflect cracks) ทำให้เพิ่มความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ ลักษณะของรอยแตกที่เกิดจากการ Indentation แสดงดังรูปที่ 5.5 รูปที่ 5.5(a) แสดง Crack Propagation ของ $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 4.8\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 7.2\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$, $K_{\text{IC}} = 4.85 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ และ รูปที่ 4.11(b) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 8.4\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 5.6\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$, $K_{\text{IC}} = 4.66 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ มีลักษณะเป็นเส้นตรง กรณี Crack Propagation ของ $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$, $K_{\text{IC}} = 7.41 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ดังรูปที่ 5.5(c) และรูปที่ 5.5(d) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$, $K_{\text{IC}} = 7.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ มีลักษณะเป็นพื้นปลา

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ Al_2O_3 กับค่า Aspect Ratio และรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ Al_2O_3 กับค่าความต้านทานการแตกหัก พบว่าเมื่อปริมาณของ Al_2O_3 ลดลง ทำให้สัดส่วนของ Y_2O_3 เพิ่มขึ้น ผลปรากฏว่าค่า Aspect Ratio และค่าความต้านทานการแตกหัก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ Y_2O_3

จากเหตุผลดังกล่าวแสดงว่า ส่วนผสมทางเคมีของเฟสแก้วเหลว (Liquid Phase) ที่มีปริมาณ Y_2O_3 สูงจะมีความหนืดสูง (High Viscosity) มีผลต่อกระบวนการ Liquid Phase Sintering ของซิลิคอนไนไตรด์ในขั้นตอน Solution - Diffusion - Precipitation ส่งผลให้การโตของเกรน β - Si_3N_4 ในแนวแกน c ได้ดี¹⁴ และเป็นเหตุให้ค่า Aspect Ratio ของเกรน β - Si_3N_4 ภายหลังจากซินเทอริงมีค่าสูง

เมื่อนำค่าความต้านทานต่อการแตกหักกับค่า Mean Diameter ของเกรน β - Si_3N_4 และค่าความต้านทานต่อการแตกหักกับค่า Mean Aspect Ratio ของเกรน β - Si_3N_4 จากตารางที่ 5.3 มาสร้างแผนภาพกระจุกกระจาย (Scatter Diagram) ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ตามลำดับ ปรากฏว่าเมื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) และทำการทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยวิธี t - test³⁴ ได้ค่าดังตารางที่ 5.4



(a)

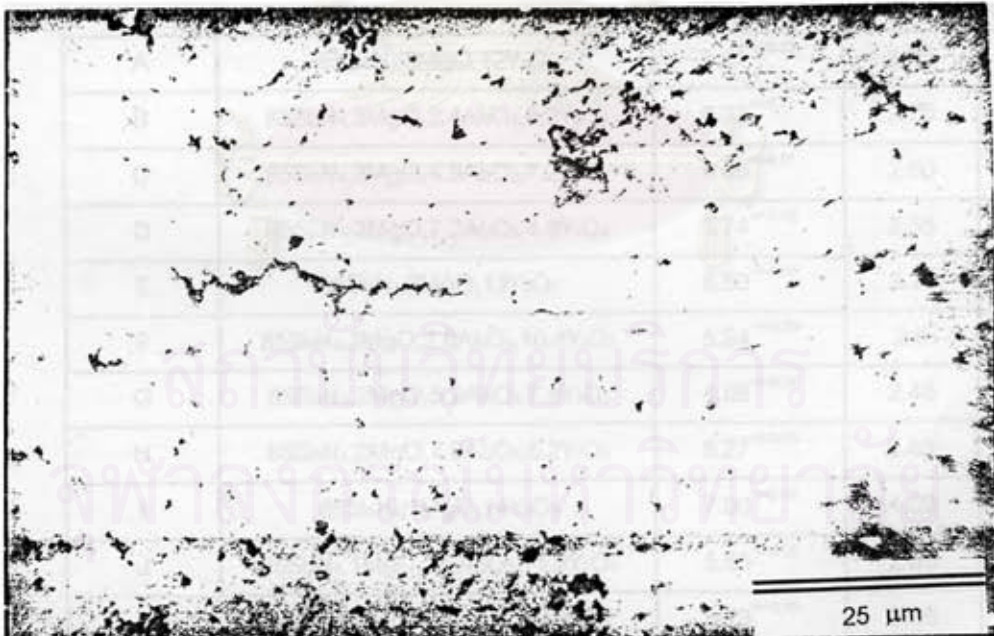


(b)

รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะของรอยแตกที่เกิดจากการ Indentation (a) ของ $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\%\text{MgO} + 12\text{wt}\%$
 $(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3, 2 : 3), K_{\text{IC}} = 4.85 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (b) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 14\text{wt}\%$
 $(\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Y}_2\text{O}_3, 3 : 2), K_{\text{IC}} = 4.66 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$



(c)



(d)

รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะของรอยแตกที่เกิดจากการ Indentation (c) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\% \text{MgO} + 12\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$, $K_{IC} = 7.41 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (d) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\% \text{MgO} + 14\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$, $K_{IC} = 7.00 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

การทำนายค่าความต้านทานการแตกหักด้วยวิธี Linear Regression จะได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดัด (y) กับ Mean Aspect Ratio (x) ดังสมการ

$$y = 1.5039x + 1.4109, R^2 = 0.7825$$

และได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดัด (y) กับ Mean Diameter (x) ดังสมการ

$$y = 1.7981x + 4.683, R^2 = 0.0529$$

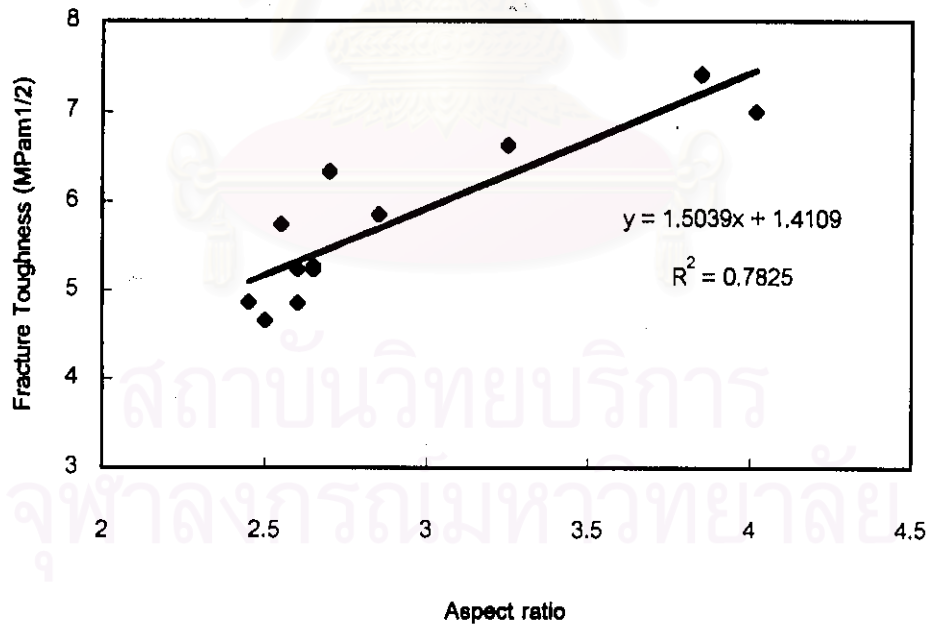
จากตารางที่ 5.4 เมื่อเปรียบเทียบค่า t กับ $t_{0.05,10}$ พบว่ากรณีของความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Diameter ค่า $t < t_{0.05,10}$ ดังนั้นสรุปได้ว่าความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Diameter มีความสัมพันธ์กันอย่างไม่มีความสำคัญทางสถิติ สำหรับความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Aspect Ratio ค่า $t > t_{0.05,10}$ ดังนั้นสรุปได้ว่าความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Aspect Ratio มีความสัมพันธ์กันอย่างมีความสำคัญทางสถิติ

สัญลักษณ์	สารตั้งต้น	Fracture Toughness (MPa.m ^{1/2})	Mean Aspect Ratio	Mean Diameter (ไมครอน)
A	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,12Y ₂ O ₃	7.41 ^{+/-0.33}	3.85	0.62
B	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,2.4Al ₂ O ₃ ,9.6Y ₂ O ₃	6.33 ^{+/-0.51}	2.70	0.65
C	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,4.8Al ₂ O ₃ ,7.2Y ₂ O ₃	4.85 ^{+/-0.21}	2.60	0.68
D	85Si ₃ N ₄ ,3MgO,7.2Al ₂ O ₃ ,4.8Y ₂ O ₃	5.74 ^{+/-0.58}	2.55	0.51
E	85Si ₃ N ₄ ,2MgO,13Y ₂ O ₃	6.63 ^{+/-0.50}	3.25	0.64
F	85Si ₃ N ₄ ,2MgO,2.6Al ₂ O ₃ ,10.4Y ₂ O ₃	5.24 ^{+/-0.39}	2.6	0.68
G	85Si ₃ N ₄ ,2MgO,5.2Al ₂ O ₃ ,7.8Y ₂ O ₃	4.86 ^{+/-0.36}	2.45	0.40
H	85Si ₃ N ₄ ,2MgO,7.8Al ₂ O ₃ ,5.2Y ₂ O ₃	5.27 ^{+/-0.26}	2.65	0.65
I	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,14Y ₂ O ₃	7.00 ^{+/-0.48}	4.02	0.53
J	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,2.8Al ₂ O ₃ ,11.2Y ₂ O ₃	5.85 ^{+/-0.32}	2.85	0.74
K	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,5.6Al ₂ O ₃ ,8.4Y ₂ O ₃	5.23 ^{+/-0.35}	2.65	0.68
L	85Si ₃ N ₄ ,1MgO,8.4Al ₂ O ₃ ,5.6Y ₂ O ₃	4.66 ^{+/-0.20}	2.50	0.38

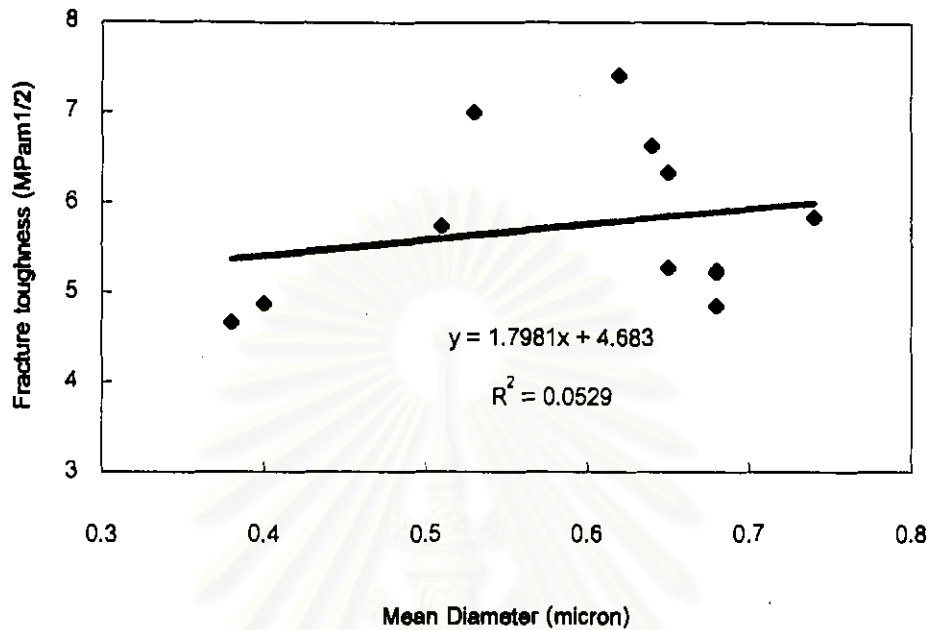
ตารางที่ 5.3 แสดง Mean Diameter Mean Aspect ratio ความต้านทานต่อการแตกหัก และปริมาณสารปรับปรุงสมบัติ

ค่าทางสถิติ	R	N	t	$t_{0.05,10}$
ตัวแปร				
ความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Diameter	0.2300	12	0.74	1.81
ความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Aspect Ratio	0.8846	12	2.655	1.81

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าทางสถิติของความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Diameter และ Mean Aspect Ratio



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Aspect Ratio



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Diameter

การนำค่าความต้านทานต่อการแตกหักด้วยวิธี Linear Regression ที่อยู่ในรูปของ $y = c + ax$ จะได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกหักกับ Mean Diameter ของเกรน β - Si_3N_4 และ Mean Aspect Ratio ดังความสัมพันธ์

$$K_{IC} = 1.4109 + 1.5039 Ar, R^2 = 0.7825$$

โดยที่ K_{IC} คือ ความต้านทานแรงดัด, $\text{MPa.m}^{1/2}$

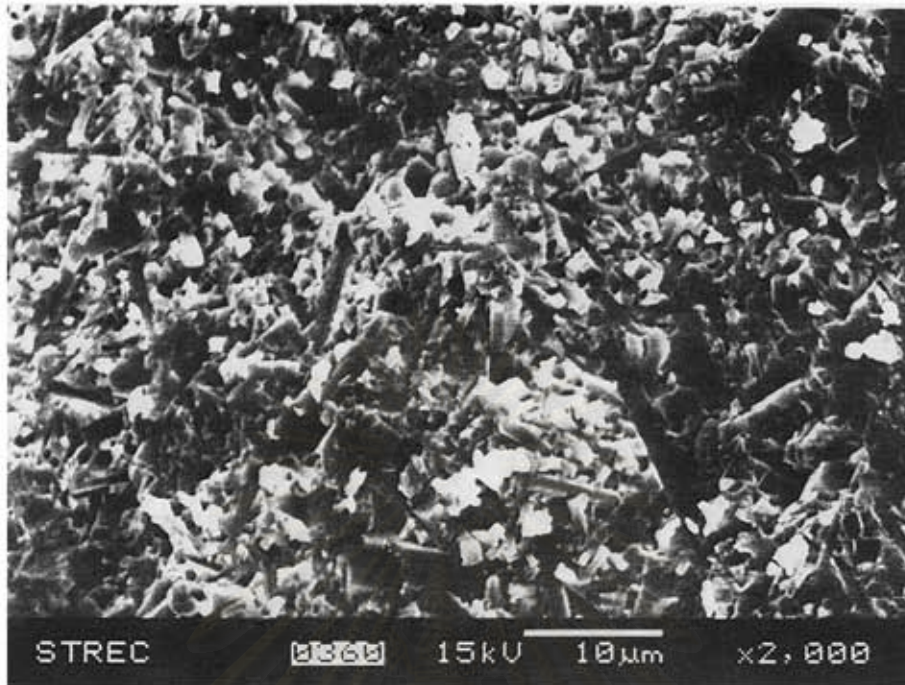
Ar คือ Mean Aspect Ratio

5.4 ผลด้านความต้านทานแรงดัด

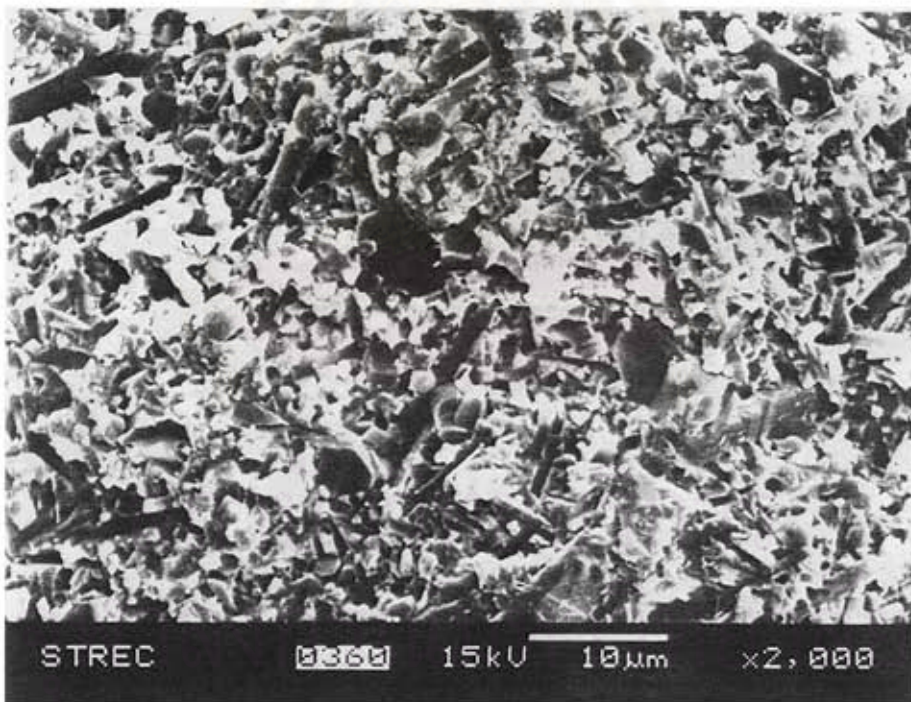
การตรวจสอบภาพถ่ายบริเวณผิวรอยแตกภายหลังการทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของ ซิลิคอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิห้องแสดงดังรูปที่ 5.8 เซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่มีสารปรับปรุงสมบัติ 2wt%MgO + 2.6wt%Al₂O₃ + 10.4wt%Y₂O₃ และ 1wt%MgO + 2.8wt%Al₂O₃ + 11.2wt%Y₂O₃ ไม่มี Pore ดังรูปที่ 4.4(a) และ (b) สำหรับเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่มีสารปรับปรุงสมบัติ 3wt%MgO + 2.4wt%Al₂O₃ + 9.6wt%Y₂O₃, 2wt%MgO + 13wt%Y₂O₃, 3wt%MgO + 7.2wt%Al₂O₃ + 4.8wt%Y₂O₃ และ 1wt%MgO + 8.4wt%Al₂O₃ + 5.6wt%Y₂O₃ พบ Pore ขนาดประมาณ 2,3,4 และ 8 ไมครอนตามลำดับดังรูปที่ 5.3 (c),(d) และ (e)

สัญลักษณ์	สารตั้งต้น	Flexural Strength (Mpa)	Mean Diameter (ไมครอน)	Mean Aspect Ratio	%TD
A	85Si ₃ N ₄ , 3MgO, 12Y ₂ O ₃	898.284 ^{+90.402}	0.62	3.85	98.28
B	85Si ₃ N ₄ , 3MgO, 2.4Al ₂ O ₃ , 9.6Y ₂ O ₃	609.386 ^{+144.156}	0.65	2.70	97.01
C	85Si ₃ N ₄ , 3MgO, 4.8Al ₂ O ₃ , 7.2Y ₂ O ₃	638.566 ^{+58.526}	0.68	2.60	97.41
D	85Si ₃ N ₄ , 3MgO, 7.2Al ₂ O ₃ , 4.8Y ₂ O ₃	459.632 ^{+62.091}	0.51	2.55	96.85
E	85Si ₃ N ₄ , 2MgO, 13Y ₂ O ₃	564.695 ^{+81.077}	0.64	3.25	94.80
F	85Si ₃ N ₄ , 2MgO, 2.6Al ₂ O ₃ , 10.4Y ₂ O ₃	493.404 ^{+493.404}	0.88	2.6	98.70
G	85Si ₃ N ₄ , 2MgO, 5.2Al ₂ O ₃ , 7.8Y ₂ O ₃	710.298 ^{+198.544}	0.40	2.45	97.84
H	85Si ₃ N ₄ , 2MgO, 7.6Al ₂ O ₃ , 5.2Y ₂ O ₃	575.407 ^{+63.778}	0.65	2.65	96.74
I	85Si ₃ N ₄ , 1MgO, 14Y ₂ O ₃	816.786 ^{+37.544}	0.53	4.02	97.08
J	85Si ₃ N ₄ , 1MgO, 2.6Al ₂ O ₃ , 11.2Y ₂ O ₃	594.812 ^{+63.393}	0.74	2.85	99.04
K	85Si ₃ N ₄ , 1MgO, 5.6Al ₂ O ₃ , 8.4Y ₂ O ₃	617.178 ^{+50.973}	0.68	2.65	98.01
L	85Si ₃ N ₄ , 1MgO, 8.4Al ₂ O ₃ , 5.6Y ₂ O ₃	473.173 ^{+147.277}	0.38	2.50	98.97

ตารางที่ 5.5 แสดง Mean Diameter Mean Aspect ratio ความต้านทานแรงดัดกับปริมาณสารปรับปรุงสมบัติและหนาแน่นภายหลังการทำซินเทอร์

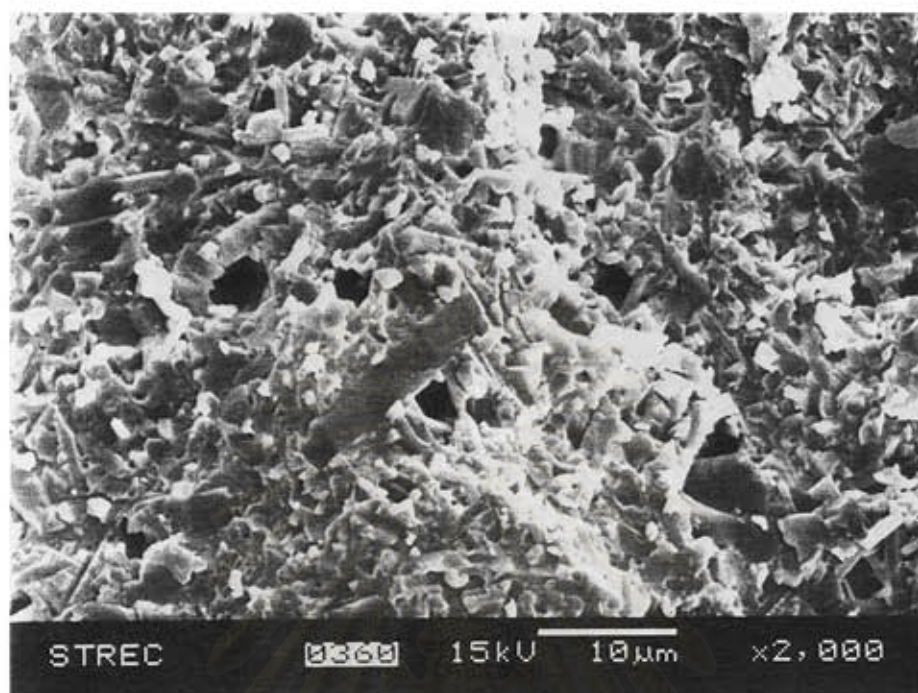


(a)

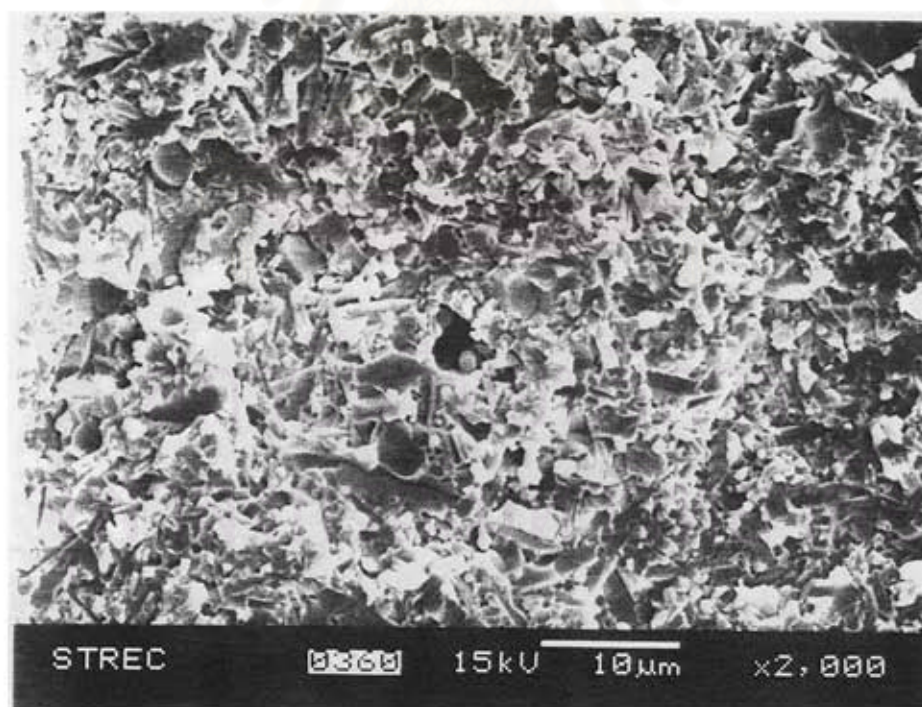


(b)

รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวรอยแตกภายหลังการทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิห้อง (a) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\%\text{MgO} + 2.6\text{ wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 10.4\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$, 98.70%TD (b) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\%\text{MgO} + 2.8\text{wt}\%\text{Al}_2\text{O}_3 + 11.2\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$, 99.04%TD

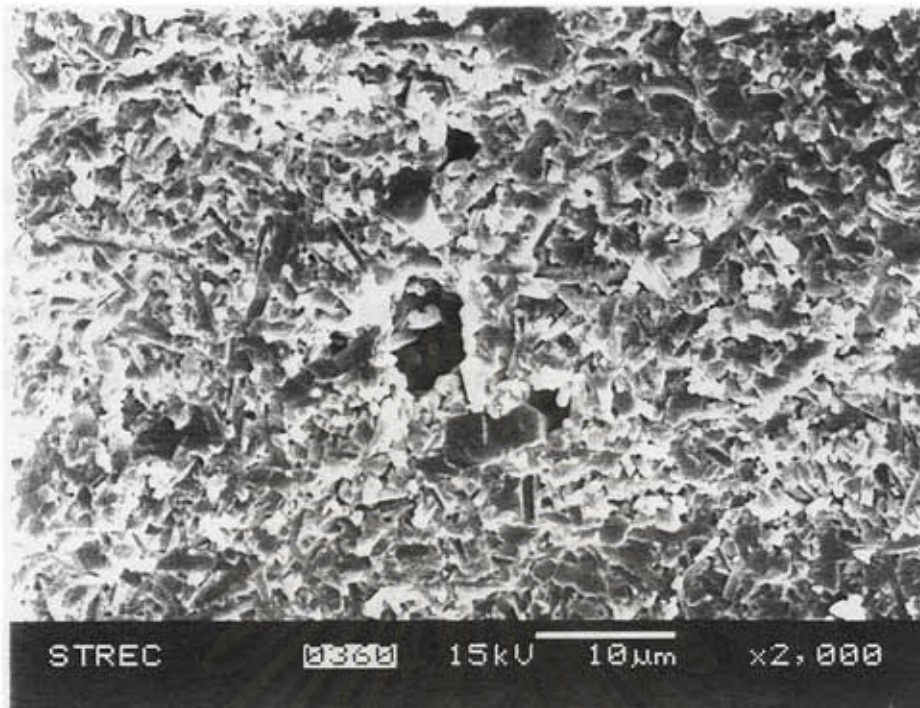


(c)

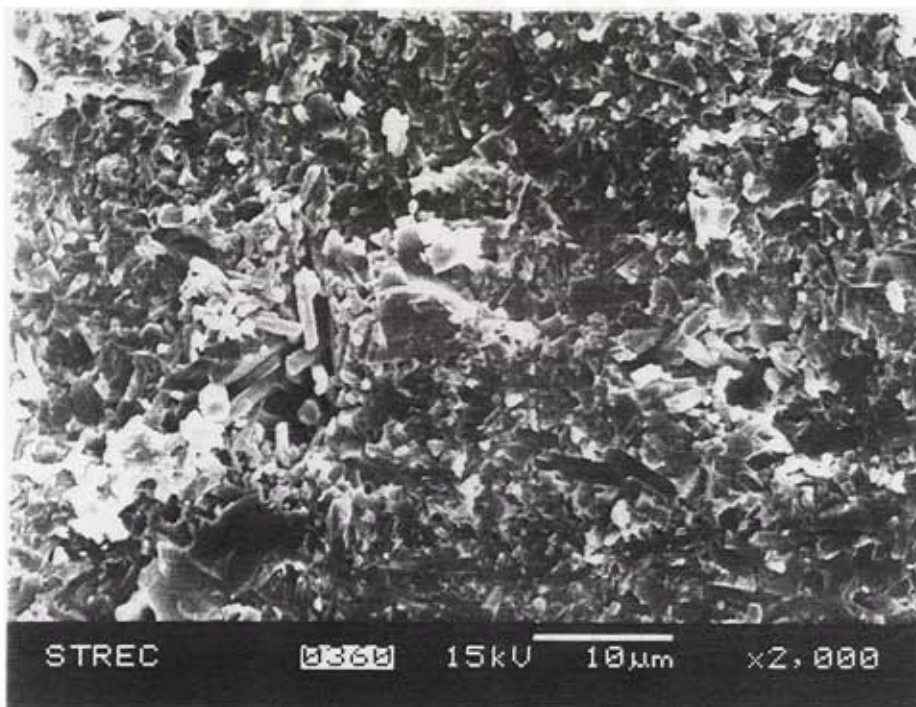


(d)

รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวรอยแตกภายหลังจากทดสอบหาความต้านทานแรงดึงของเซรามิกซิลิโคนไนไตรด์ที่อุณหภูมิห้อง (c) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 2\text{wt}\% \text{MgO} + 13\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3, 94.80\% \text{TD}$
 (d) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\% \text{MgO} + 8.4\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 5.6\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3, 96.07\% \text{TD}$



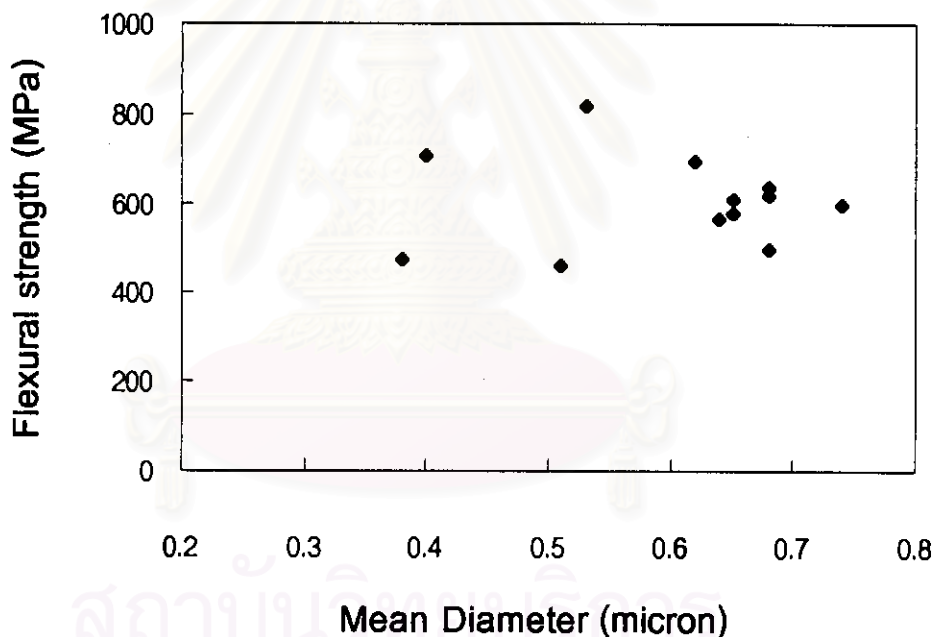
(e)



(f)

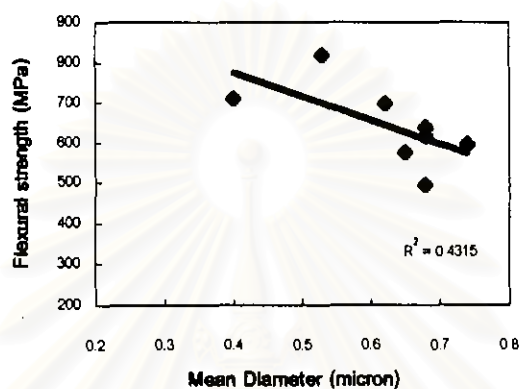
รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวรอยแตกภายหลังการทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิห้อง (e) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\text{wt}\% \text{MgO} + 8.4\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 5.6\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$, 96.97%TD
(f) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\text{wt}\% \text{MgO} + 2.4\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 9.6\text{wt}\% \text{Y}_2\text{O}_3$, 97.01%TD

จากตารางที่ 5.5 และ รูปที่ 5.9 พบว่าค่า ความต้านทานแรงดัด ของซิลิคอนไนไตรด์ภายหลังจากทำ ซินเทอร์ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 816.786 MPa (97.08 % TD) โดยมีขนาดเกรนเท่ากับ 0.53 ไมครอนที่ Composition I และ 710.298 MPa (97.84% TD)ขนาดเกรนเท่ากับ 0.4 ไมครอนที่ Composition G เมื่อขนาดเกรน β เพิ่มสูงขึ้น ค่า ความต้านทานแรงดัด จะมีแนวโน้มลดลงเช่นที่ Composition J และ F ค่าความต้านทานแรงดัด มีค่าเท่ากับ 594.812 MPa (99.04%TD) และ 493.404MPa (98.7 %TD) โดยที่มีขนาดเกรน β เท่ากับ 0.74 และ 0.68 ตามลำดับ

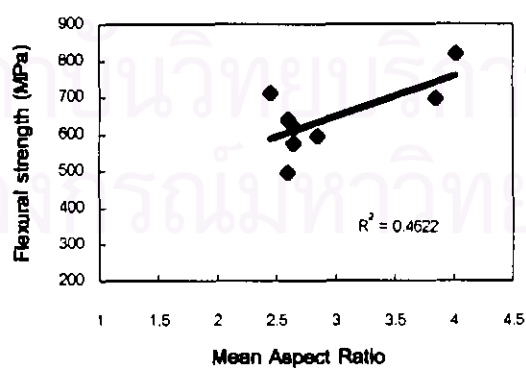


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานแรงดัด กับ Mean Diameter

เมื่อนำค่าความต้านทานแรงดัดกับ Mean Diameter ของเกรน β -Si₃N₄ จากตารางที่ 5.5 มาสร้างแผนภาพกระจัดกระจาย (Scatter Diagram) ปรากฏว่าจุดต่างๆกระจายไม่เป็นระเบียบ เมื่อพิจารณาค่า Relative Density จากตารางที่ 5.5 และภาพถ่ายรอยแตกรูปที่ 4.5c ถึง f พบว่ามีรูพรุนซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ จึงได้ทำการตัดข้อมูลของส่วนผสมทางเคมี B, D, E และ L ดังนั้นแผนภาพกระจัดกระจายภายหลังจากตัดข้อมูลเป็นไปตามรูปที่ 5.10 และ 5.11



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานแรงดัด กับ Mean Diameter ภาย หลังตัดข้อมูลของส่วนผสมทางเคมี B, D, E และ L



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานแรงดัด กับ Mean Aspect Ratio ภาย หลังตัดข้อมูลของส่วนผสมทางเคมี B, D, E และ L

จากแผนภาพกระจายรูปที่ 5.10 และ 5.11 เมื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) และทำการทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ด้วยวิธีค่า $t - test$ ³⁷ ได้ค่าดังตารางที่ 5.6

ตัวแปร	ค่าทางสถิติ			
	r	.t	N	$t_{0.05,8}$
ความต้านทานแรงดัดกับ Mean Diameter	-0.6569	5.2274	8	1.943
ความต้านทานแรงดัดกับ Mean Aspect Ratio	0.6799	5.563	8	1.943

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าทางสถิติเมื่อทดสอบนัยสำคัญ

จากตารางที่ 5.6 เมื่อเปรียบเทียบค่า t กับ $t_{0.05,8}$ พบว่าค่า $t > t_{0.05,8}$ ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวแปรทั้ง 2 ชุดนี้ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 %

เนื่องจากตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดัดมี 2 ตัวแปรคือค่า Mean Diameter ของ เกรน $\beta - Si_3N_4$ กับค่า Mean Aspect Ratio ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้นำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ โดยให้ความต้านทานแรงดัดเป็นตัวแปรตาม (Dependent Variable) และ Mean Diameter ของ เกรน $\beta - Si_3N_4$ กับ Mean Aspect Ratio เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) จากการหาค่าสัมประสิทธิ์พหุคูณ (Multiple Correlation, R) และทำการทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณด้วยวิธีทดสอบค่า $F - test$ ได้ค่าดังตารางที่ 5.7

ตัวแปร	ค่าทางสถิติ			
	R	R^2	F	$F_{0.05,2,8}$
ความต้านทานแรงดัดกับ Mean Diameter และ Mean Aspect Ratio	0.8837	0.7810	8.913	5.79

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณและค่าสถิติในการทดสอบนัยสำคัญด้วยวิธีทดสอบ $F - test$

จากตารางที่ 5.7 เมื่อเปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับ $F_{0.05,2,8}$ พบว่าค่า $F_{คำนวณ} > F_{0.05,2,8}$ แสดงว่า ข้อมูลชุดนี้มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยความเชื่อมั่น 95 %

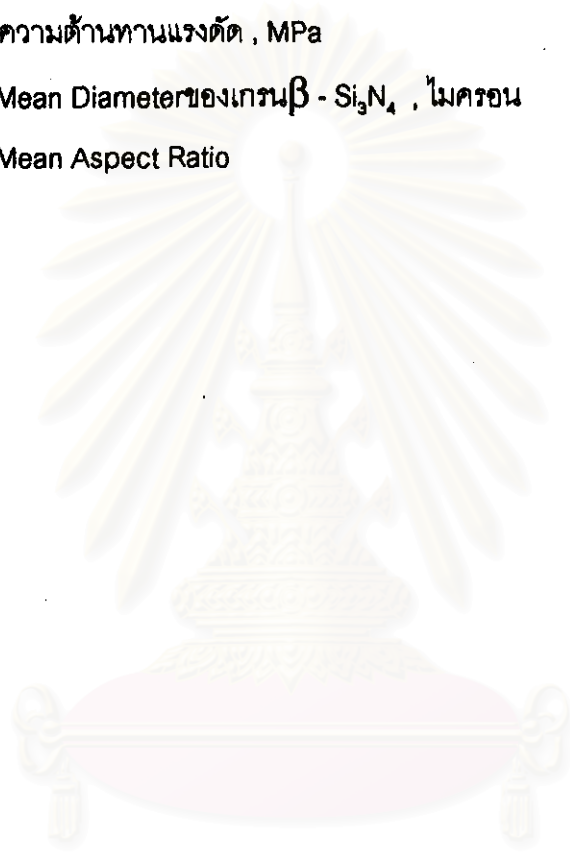
การทำนายค่าความต้านทานแรงดัดด้วยวิธี Multiple Linear Regression ที่อยู่ในรูปของ
 $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$ จะได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดัดกับ Mean Diameter ของเกรน
 β - Si_3N_4 และ Mean Aspect Ratio ดังความสัมพันธ์

$$\sigma = 681.328 - 516.013 D + 95.558 \text{Ar}, R^2 = 0.7810$$

โดยที่ σ คือ ความต้านทานแรงดัด, MPa

D คือ Mean Diameter ของเกรน β - Si_3N_4 , ไมครอน

Ar คือ Mean Aspect Ratio



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย