

การเผาแบบปราศจากแรงดันของซิลิคอนไนไตรด์โดยใช้อิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์และ
แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นสารปรับปรุงสมบัติ



นายวีระศักดิ์ หอมกระจาย

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-325-3

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

24 ต.ค. 2545

119232469

PRESSURELESS SINTERING OF SILICON NITRIDE USING Y_2O_3 - Al_2O_3 -MgO
AS ADDITIVES



Mr.Werasak Homkajai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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


Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

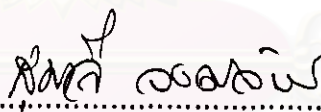
ISBN 974-334-325-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเผาแบบปราศจากแรงดันของซิลิคอนไนไตรต์โดยใช้ อิทธิทธิยม
ออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นสารปรับปรุง
สมบัติ
โดย นายวิระศักดิ์ หอมกระจาย
ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ไสว ต่านชัยวิจิตร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ไสว ต่านชัยวิจิตร)


..... กรรมการ
(อาจารย์สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์)

วีระศักดิ์ หอมกระจาย : การเผาแบบปราศแรงดันของซิลิคอนไนไตรด์โดยใช้อิทธิพลของออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นสารปรับปรุงสมบัติ (PRESSURELESS SINTERING OF SILICON NITRIDE USING $Y_2O_3-Al_2O_3-MgO$ AS ADDITIVES) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ไสว ต่านชัยวิจิตร, 121 หน้า. ISBN 974-334-325-3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยการขึ้นรูปแบบปราศจากแรงดันของซิลิคอนไนไตรด์ โดยใช้ อิทธิพลของออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นสารปรับปรุงสมบัติ และทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง การขึ้นรูปทำโดยการบดผสมวัสดุผง $85wt\%Si_3N_4 + 15wt\%$ สารปรับปรุงสมบัติ โดยแปรเปลี่ยนสัดส่วนของ $MgO:Al_2O_3:Y_2O_3$ ทั้งหมด 12 ส่วนผสม จากนั้นนำผงผสมอัดในแม่พิมพ์ เครื่องอัดทุกทิศทาง และทำการซินเทอที่อุณหภูมิ $1800^{\circ}C$ นาน 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 1 บรรยากาศ ความหนาแน่นทั้งชิ้นงานภายหลังการซินเทอมีค่า 3.142 ถึง 3.275 g/cm^3 (95 ถึง 99% ในทางทฤษฎี) ความหนาแน่นสูงสุดที่ส่วนผสม $1wt\%MgO+2.8wt\%Al_2O_3+11.2wt\%Y_2O_3$ ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่า ความแข็งอยู่ในช่วง 1105 ถึง 1576 kg.m^{-2} ยังกิโลตุลล์อยู่ในช่วง 261.3 ถึง 290.6 GPa ความต้านทานต่อการแตกหักอยู่ในช่วง 4.66 ถึง $7.41\text{ MPa.m}^{1/2}$ โดยที่คุณสมบัติข้างต้นมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสม $3wt\%MgO+12wt\%Y_2O_3$ สำหรับความต้านทานแรงดัดที่ได้อยู่ในช่วง 459 ถึง 816 MPa โดยมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสม $1wt\%MgO+14wt\%Y_2O_3$ ส่วนท้ายของงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคต่อความต้านทานต่อการแตกหัก และความต้านทานแรงดัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ..วีระศักดิ์ หอมกระจาย.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..ดร. ต่านชัยวิจิตร.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..

3971778021 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: SILICON NITRIDE / SINTERING / PRESSURELESS

WERASAK HORMKAJAI : PRESSURELESS SINTERING OF SILICON NITRIDE USING Y_2O_3 - Al_2O_3 -MgO AS ADDITIVES. THESIS ADVISOR : SAWAI DANCHAIVIJIT , Ph.D. 121 pp. ISBN 974-334-325-3

Silicon nitride specimens using yttrium , oxide aluminium oxide and magnesium oxide as additives were fabricated via pressureless sintering, and then mechanically tested. The ceramic powders were mixed at the fixed composition of 85wt% Si_3N_4 and 15wt% additives, but ratio of $Y_2O_3:Al_2O_3:MgO$ additives were varied with 12 compositions. All mixed powders were die pressed,CIPed ,and then sintered at 1800°C for 3 hours under 0.1 MPa nitrogen pressure. The bulk density of sintered specimens were ranging from 3.142-3.275 g/cm³ (95-99% theoretical density) and the additive composition of 1wt%MgO + 2.8wt% Al_2O_3 + 11.2wt% Y_2O_3 obtained the highest density. The hardness of sintered specimens were ranging from 1105-1576 kg.m⁻² and the additive composition of 3wt%MgO + 12wt% Y_2O_3 obtained the highest hardness. The young's modulus of sintered specimens were ranging from 261.3-290.6 GPa and the additive composition of 3wt%MgO + 12wt% Y_2O_3 obtained the highest young's modulus. The fracture toughness of sintered specimens were ranging from 4.66-7.41 MPa.m^{1/2} and the additive composition of 3wt%MgO + 12wt% Y_2O_3 obtained the highest fracture toughness. The flexural strength of sintered specimens were ranging from 459-816 MPa and the additive composition of 1wt%MgO + 14wt% Y_2O_3 obtained the highest flexural strength. The effects of microstructure to the fracture toughness and flexural strength were discussed.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต*วัชรพงศ์ ทองกรทอง*.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา*ส. อนุพันธ์วิจิตร*.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี โดยการให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.ดร.ไสว ด้านชัยวิจิตร และคณะกรรมการที่ได้ให้คำแนะนำรวมทั้งแนวทางที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหัวหน้ากองโรงงาน คุณสุรเชษฐ์ พิพัฒสัตยานวงศ์, วิศวกรระดับ 9 คุณสิทธิเดช ปภังกร, หัวหน้าแผนกเครื่องจักรกลโรงงาน คุณสินवल อรรถเมธี, หัวหน้าแผนกโรงงาน 2 คุณบรรเจิด แพนมงคล, พนักงานกองทดสอบเครื่องกลและพนักงานกองโรงงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย รวมทั้งคุณสิริพรรณ นิลไพรัช และพนักงานของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคนที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทั้ง ด้านเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและกำลังใจแก่ผู้วิจัย และทุน สวทช. ในการสนับสนุนงานวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา ภรรยาและลูกๆรวมทั้งญาติผู้ใหญ่ทุกๆท่านซึ่งให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัยจนสามารถทำงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

นายวีระศักดิ์ หอมกระจ่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.1.1 Hot Pressed Silicon Nitride (HPSN)	3
1.1.2 Sintered Silicon Nitride (SSN)	3
1.1.3 Sintered Reaction-Bonded Silicon Nitride (SRBSN)	3
1.1.4 Hot Isostatically Pressed Silicon Nitride (HIPSIN)	4
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3.1 ศึกษาสัดส่วนของสารปรับปรุงสมบัติ	4
1.3.2 ทดสอบหาความแข็งแรงต่อการดัด (Flexural Strength) และความเหนียว . ต่อการแตกหัก (Fracture Toughness) ที่อุณหภูมิห้อง.....	4
1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับสัดส่วนของสารปรับปรุงสมบัติ.....	4
1.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงต่อการดัดกับสัดส่วนของสารปรับปรุง สมบัติ.....	5
1.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการแตกหักกับสัดส่วนของสารปรับ ปรุงสมบัติ.....	5
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	6
2.1 โครงสร้างทางผลึก.....	6

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2 กลไกและบทบาทของสารปรับปรุงสมบัติต่อการขึ้นเทอร์เซรามิกซิลิคอนไนไตรด์.....	7
2.3 บทบาทของแมกนีเซียมออกไซด์,อิทเทรียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อคุณ สมบัติ ของซิลิคอนไนไตรด์.....	9
2.3.1 ด้านความหนาแน่น.....	9
2.3.2 ด้านความต้านทานแรงดัด.....	13
2.3.3 ด้านความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน.....	15
2.4 บทบาทของสารปรับปรุงสมบัติตัวอื่น ๆ.....	17
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	19
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	19
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2.1 ผงเซรามิก	19
3.2.2 เม็ดบด.....	20
3.2.3 ตัวกลางช่วยการกระจายตัว.....	20
3.2.4 สารช่วยการเกาะยึด.....	20
3.3 ขั้นตอนการทดลอง (Procedures)	20
3.3.1 การเตรียมผง.....	20
3.3.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง ผงผสมซิลิคอนไนไตรด์.....	21
3.4 การทดสอบ.....	25
3.4.1 การทดสอบความหนาแน่น.....	25
3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....	25
3.4.3 การหา Young's Modulus.....	26
3.4.4 การทดสอบความต้านทานแรงดัด.....	28
3.4.5 การทดสอบความแข็ง.....	28
3.4.6 การหาค่าความต้านทานต่อการแตกหัก.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 ขนาดของผงเซรามิก.....	30

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 การวัดขึ้นรูปซิลิคอนไนไตรต์.....	34
4.3 ผลทางด้านโครงสร้างจุลภาค.....	37
4.4 คุณสมบัติทางกลของเซรามิกซิลิคอนไนไตรต์.....	42
4.4.1 การทดสอบความแข็ง.....	42
4.4.2 Young's Modulus.....	46
4.4.3 การทดสอบความต้านทานต่อการแตกหัก.....	47
4.4.4 การทดสอบความต้านทานแรงดัด.....	50
บทที่ 5 อภิปรายผลการทดลอง.....	56
5.1 ผลด้านความหนาแน่น.....	56
5.2 ผลด้าน Young's Modulus of Elasticity (E)	61
5.3 ผลด้านความต้านทานการแตกหัก.....	64
5.4 ผลด้านความต้านทานการแรงดัด.....	67
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอนะ.....	74
6.1 สรุปผลการทดลอง	74
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานแรงดัดแบบ Three Point Bending.....	79
ภาคผนวก ข กราฟความสัมพันธ์ของ Load กับ Displacement จากการทดสอบ ความต้านทานแรงดัดแบบ Three Point Bending.....	93
ภาคผนวก ค ภาพชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	108
ภาคผนวก ง ภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	111
ภาคผนวก จ กราฟเส้นโค้งความถี่สะสม.....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

5.7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณและค่าสถิติในการทดสอบนัยสำคัญด้วยวิธีทดสอบ F – test.....	72
-----	---	----



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 แสดงผลการเพิ่มประสิทธิภาพของ เซรามิกเทอร์โบชาตเจอร์ในเครื่องยนต์ทดสอบโดยบริษัท ไคโยด้ามอเตอร์.....	1
1.2 แสดงชิ้นงานของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ (A) Turbine Stator ผลิตด้วยวิธี RBSN+MgO; ความหนาแน่น 3.19 g/cm ³ (B) Turbocharger Rotor ผลิตด้วยวิธี RBSN+Y ₂ O ₃ ; ความหนาแน่น 3.19 g/cm ³	2
2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของ(a) อัลฟา-ซิลิคอนไนไตรด์และ (b) เบต้า-ซิลิคอนไนไตรด์.....	7
2.2 Kingery Modedl Plot for Sintering of Nitrogen Ceramics.....	8
2.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของกระบวนการ Sintering ของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์.....	8
2.4 แสดงภาพถ่าย SEM ภายหลังจากทำซินเทอร์ของ Si ₃ N ₄ กับ 7wt%Y ₂ O ₃ / 3wt% MgO ที่อุณหภูมิ 1730 °C เวลา 1 ชั่วโมง	9
2.5 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นและการเปลี่ยนแปลงของ Si ₃ N ₄ ที่มี MgO เป็นสารปรับปรุงสมบัติ , t=นาทึ	10
2.6 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นและการเปลี่ยนแปลงของ Si ₃ N ₄ ที่มี Y ₂ O ₃ เป็นสารปรับปรุงสมบัติ , t=นาทึ	10
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น, การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และการหดตัว กับอุณหภูมิการทำซินเทอร์ของ (A) Si ₃ N ₄ +8%Y ₂ O ₃ และ (B) Si ₃ N ₄ +8%Y ₂ O ₃ +1%MgO.....	11
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น Si ₃ N ₄ -15Y ₂ O ₃ กับปริมาณ wt%Al ₂ O ₃ (ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน 2 MPa).....	12
2.9 แสดงผลของจำนวนการเติม Al ₂ O ₃ ต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและความหนาแน่นของ Gas Pressure Sintered Si ₃ N ₄ +5wt%Y ₂ O ₃	12
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง กับอุณหภูมิของ Si ₃ N ₄ + 6wt%Y ₂ O ₃ ; 2.5wt%Al ₂ O ₃ ; 1.5 wt% Al ₂ O ₃ ; 0 wt%Al ₂ O ₃	13
2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแรงดัดที่อุณหภูมิสูงของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์.....	14

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัด กับปริมาณ Y_2O_3 และ Al_2O_3 ของการ ซินเทอร์ Si_3N_4 ที่อุณหภูมิ 1775, 1800 และ 1825 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่ 0.9 MPa	14
2.13 แสดงน้ำหนักที่ได้เนื่องจากออกซิเดชันต่อหน่วยพื้นผิว ที่อุณหภูมิ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ของ Hot Pressed $Si_3N_4 + 2 \text{ wt}\% Al_2O_3 + X \text{ wt}\% Y_2O_3$	15
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ได้กับปริมาณ $\text{wt}\% MgO$ ที่เติมเข้าไปใน Si_3N_4	16
2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ได้กับปริมาณ $\text{wt}\% Y_2O_3$ ที่เติมเข้าไปใน Si_3N_4	16
2.16 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ได้จากการเกิดออกซิเดชันกับ เวลาของ $Si_3N_4 - 15Y_2O_3$ ที่มีปริมาณ $\text{wt}\% Al_2O_3$ ต่างกัน.....	17
2.17 แสดงแผนที่ความหนาแน่นของซิลิคอนไนไตรด์ในรูปแบบของการซินเทอร์กับสารปรับ ปรุงสมบัติ (20wt%),	18
3.1 แสดงขั้นตอนการทดลอง.....	22
3.2 แสดงภาพวาดในการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์.....	23
3.3 แสดงภาพวาดการอัดขึ้นรูปทุกทิศทาง.....	24
3.4 แสดงภาพวาดไดอะแกรมของเวลาและอุณหภูมิที่ทำการซินเทอร์.....	25
3.5 แสดงภาพวาดการวิเคราะห์ Aspect Ratio ของ $\beta - Si_3N_4$	26
3.6 แสดง Load Displacement Diagram และ วิธี Correction (a) Correcting Method of Measured Value (b) Load Displacement Diagram after Correction.....	27
3.7 แสดงการทดสอบแบบ Three Point Bending.....	28
3.8 แสดงภาพวาดของรอยกด.....	29
4.1 แสดงภาพถ่ายลักษณะวัสดุผง	31
4.2 แสดงขนาดของผงผสมหลังผ่านการบดนาน 72 ชั่วโมงด้วยเม็ดบดซิลิคอนไนไตรด์.....	33
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Al_2O_3 และความหนาแน่น(Bulk Density)ของ ชิ้นงานที่ผ่านการซินเทอร์.....	36
4.4 แสดงลักษณะที่เป็น Rod-Shape ของเกรน β ของ Si_3N_4	39
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mean Diameter ของ β เกรนกับปริมาณ Al_2O_3	41
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Aspect ratio เฉลี่ยของ β เกรน กับปริมาณ Al_2O_3	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (HV20)กับปริมาณ Al_2O_3	43
4.9 แสดงภาพถ่ายของรอยกดเนื่องจาก Vickers Hardness Testing ที่ Load 20 กิโลกรัม.....	44
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อการแตกหักกับปริมาณ Al_2O_3	49
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Al_2O_3 กับค่าความต้านทานแรงดัดหลังการทำซินเทอร์.....	51
5.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของ ระบบ $MgO-Al_2O_3-SiO_2$	54
5.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ $Al_2O_3-Y_2O_3-SiO_2$	55
5.3 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น(Bulk Density)กับปริมาณ Al_2O_3 กับผลงานของ Eiji Tani และผู้ร่วมงาน.....	56
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับ Relative density.....	59
5.5 แสดงลักษณะของรอยแตกที่เกิดจากการ Indentation.....	61
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Aspect Ratio...64	
5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานต่อการแตกหัก กับ Mean Diameter.....65	
5.8 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวรอยแตกภายหลังจากทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของเซรามิก ซิลิคอนไนไตรด์ที่อุณหภูมิห้อง.....	67
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานแรงดัด กับ Mean Diameter.....	70
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานแรงดัด กับ Mean Diameter ภายหลังตัดข้อมูลของส่วนผสมทางเคมี B, D, E และ L.....	71
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานแรงดัด กับ Mean Aspect Ratio ภายหลังตัดข้อมูลของส่วนผสมทางเคมี B, D, E และ L.....	71

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 การใช้เซรามิกสำหรับชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ในประเทศญี่ปุ่น.....	2
2.1 แสดงคุณสมบัติของซิลิคอนไนไตรด์	6
2.2 แสดงความสามารถในการขึ้นเทอร์ของซิลิคอนไนไตรด์ (80wt%) กับความแตกต่าง ของอัตราส่วน $(Y_{0.8}La_{0.2})_2O_3:AlN$	18
3.1 แสดงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผง $Si_3N_4 : Y_2O_3 : Al_2O_3 : MgO$	21
4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนและหลังการขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ $1800^{\circ}C$ ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	34
4.2 แสดงค่า Mean Diameter และ Aspect ratio ของ Si_3N_4	38
4.3 แสดงค่าความแข็งของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ที่ได้จากการทดลอง.....	42
4.4 แสดงค่าของ Young's Modulus ของ Si_3N_4 ก่อนและหลังการทำ Correcting Method.....	46
4.5 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า K_{IC} ที่ได้จากการทดลองแต่ละส่วนผสมของซิลิคอนไนไตรด์.....	48
4.6 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดของเซรามิกซิลิคอนไนไตรด์ ภายหลังจากการขึ้นเทอร์.....	50
5.1 แสดงปริมาณสารปรับปรุงสมบัติที่ทำให้ความหนาแน่น %TD ภายหลังจากทำ ขึ้นเทอร์.....	53
5.2 แสดงค่า Young's Modulus กับ Relative density.....	58
5.3 แสดง Mean Diameter Mean Aspect ratio ความต้านทานต่อการแตกหัก และปริมาณสารปรับปรุงสมบัติ.....	63
5.4 แสดงค่าทางสถิติของความต้านทานแรงดัด กับ Mean Diameter และ Mean Aspect Ratio.....	64
5.5 แสดง Mean Diameter Mean Aspect ratio ความต้านทานแรงดัดกับปริมาณ สารปรับปรุงสมบัติและหนาแน่นภายหลังจากการขึ้นเทอร์.....	66
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานแรงดัด กับ Mean Aspect Ratio ภายหลัง ตัดข้อมูลของส่วนผสมทางเคมี B, D, E และ L.....	72