

การขึ้นรูปซิลิคอนไนไตรด์โดยกระบวนการ HIP

นางสาว ธนันท์ อรรถเดชดำรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-679-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 16894868

FORMING OF SILICON NITRIDE BY THE HIP PROCESS



Miss Thananan Akhadejdamrong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-633-679-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การขึ้นรูปซิลิโคนไนไตรด์โดยกระบวนการ HIP
โดย นางสาว ธนันท์ อรรถเดชดำรง
ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีทรรศน์ พันธบุรุษยงก์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ทุ่งสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นัตราชัย สมศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีทรรศน์ พันธบุรุษยงก์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เล็ก อุดตะมธิล)



รชานันท์ อรรถเดชดำรง : การขึ้นรูปซิลิคอนไนไตรด์โดยกระบวนการ HIP
(FORMING OF SILICON NITRIDE BY THE HIP PROCESS)

อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์, 139 หน้า., ISBN 974-633-679-7

การศึกษาและวิจัยการขึ้นรูปซิลิคอนไนไตรด์ความหนาแน่นสูงโดยกระบวนการ HIP แบบใช้แคปซูล มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีสมบัติเชิงกลสูง ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้ผงแอลฟา-ซิลิคอนไนไตรด์ เป็นสารตั้งต้น โดยใส่ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และผงอิทเทรียมออกไซด์ ในจำนวนร้อยละ 3 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ สัดส่วนดังกล่าวทำให้เกิดองค์ประกอบที่เป็นเฟสของเหลวที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำที่สุดภายในระบบของอะลูมิเนียมออกไซด์-อิทเทรียมออกไซด์-ซิลิคอนออกไซด์ และได้ทำการตรวจสอบสมบัติด้านความหนาแน่น โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง ค่า Young's modulus และ Fracture toughness ของชิ้นงาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ที่ได้มีความหนาแน่นสูงใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี รูปแบบพิกเอกซ์เรย์ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนเฟสจากเฟสแอลฟาเป็นเฟสเบตาเกิดขึ้นในทุก ๆ ชิ้นงาน และอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดการเปลี่ยนเฟสได้อย่างสมบูรณ์ คือ 1650 องศาเซลเซียส การเกิดเกรนเบตาที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวมีความสัมพันธ์กับการเกิดเฟสของเหลวระหว่างการเปลี่ยนเฟส ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงถึงลักษณะเกรนเบตาที่เป็นแท่งยาวนี้ ชิ้นงานที่ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีมากกว่าร้อยละ 98 จะมีค่าความแข็งระหว่าง 15 ถึง 16 GPa ค่า Young's modulus และ Fracture toughness มีค่าเท่ากับ 250 ถึง 320 GPa และ 7 ถึง 9 MPa.m^{1/2} ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา
ปีการศึกษา 2538

ลายมือชื่อนิสิต รชานันท์ อรรถเดชดำรง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม

C617911 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : HOT ISOSTATIC PRESSING (HIP)/ DENSIFICATION/SILICON NITRIDE
POWDER/ SINTERING/ MECHANICAL PROPERTY

THANANAN AKHADEJDAMRONG : FORMING OF SILICON NITRIDE BY THE
HIP PROCESS. THESIS ADVISOR: ASSO. PROF. PARITUD HANDHUBANYONG,
D.Eng. 139 pp. ISBN 974-633-679-7

The densification of silicon nitride was carried out by Hot Isostatic Press (HIP) sintering via glass-encapsulation method. The sintering techniques was studied in order to obtain high strength properties. α -Si₃N₄ raw powder was used as starting material with an addition of 3 wt% Al₂O₃ and 5 wt% Y₂O₃. This ratio corresponds to the liquid phase compositions having lowest melting temperature in the system Al₂O₃-Y₂O₃-SiO₂ which yields high strength glassy phase at room temperature. Density, microstructure, hardness, Young's modulus and fracture toughness of specimens were measured. The experimental results showed that the silicon nitride could have density nearly to the theoretical density. X-ray Diffraction pattern indicated that transformation of α -phase to β -phase occurred in all sintered specimens and the α -phase fully transformed to β -phase at the minimum temperature of 1650 °C. It was found that increasing of sintering temperature will increase the mechanical properties. Development of elongated grains were observed and believed to have been related to the formation of glassy phase during phase transformation. The SEM micrographs and fractograph also showed the β rodlike grains. For the specimens having density over than 98%, the calculated hardness were approximately between 15-16 GPa. Young's modulus and fracture toughness were approximately 250-320 GPa and 7-9 MPa.m^{1/2}, respectively.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา.....

ปีการศึกษา..... 2538

ลายมือชื่อนิติ..... ชานนกันต์ อภัยกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีทรรคนันท์ พันธบุรุษรงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เล็ก อุตตะมตีสล คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน และ คุณสิริพรรณ นิลไพรัช ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่เล็งเห็นประโยชน์ด้านงานวิจัยและพัฒนาวัสดุ รวมทั้งให้การสนับสนุนงบประมาณงานวิจัย จนก่อให้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้ได้

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และเอื้อเฟื้อด้านวัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ปฏิบัติการเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ทดสอบและมาตรฐานวิทยาศาสตร์ สาขาวิจัยอุตสาหกรรมโลหะและเซรามิก สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการวิเคราะห์และทดสอบในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุฯ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย การประสานงาน และเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ส่งลัทธิให้การเลี้ยงดู อบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต และครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุกด้าน จนสามารถสำเร็จการศึกษาสมตามเจตนารมณ์

สารบัญ



หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฃ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.2 ความสำคัญหรือประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 การผลิตซิลิคอนไนไตรด์ความหนาแน่นสูง.....	4
2.1.1 โครงสร้างผลึก.....	5
2.1.2 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก.....	7
2.1.3 กระบวนการผลิตซิลิคอนไนไตรด์ความหนาแน่นสูง.....	8
2.1.4 กลไกการเปลี่ยนแปลง.....	10
2.1.5 โครงสร้างจุลภาค.....	12
2.1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผงวัสดุ สารปรับปรุงคุณสมบัติ และสภาวะของกระบวนการ ต่อการเกิดความหนาแน่นและโครงสร้างจุลภาค.....	13
2.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก.....	20
2.3 กระบวนการ HIP.....	23
2.3.1 ประวัติการวิจัยและพัฒนากระบวนการ HIP.....	23
2.3.2 ลักษณะของกระบวนการ HIP.....	24
2.3.3 การควบคุมอุณหภูมิและความดัน.....	24
2.3.4 วิธีการแคปซูล.....	26
2.3.5 ปฏิริยาซินเทอร์ริงระหว่างการ HIP.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	ระเบียบวิธีการวิจัย.....	38
3.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	38
3.2	วัตถุดิบและสารเคมี.....	39
3.2.1	ผงซิลิคอนไนไตรต์.....	39
3.2.2	สารปรับปรุงสมบัติ.....	40
3.3	วิธีดำเนินการทดลอง.....	42
3.3.1	การออกแบบการทดลอง.....	43
3.3.2	การเตรียมตัวอย่างทดลอง และการตรวจสอบ สมบัติของตัวอย่างระหว่างกระบวนการเตรียม.....	44
3.3.3	การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์จาก การทดลอง.....	51
4	รายงานผลการทดลองและอภิปรายผล.....	55
4.1	การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น.....	55
4.2	การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารปรับปรุงสมบัติ.....	60
4.3	การศึกษาลักษณะเฉพาะของแกรนูล.....	65
4.3.1	ลักษณะเฉพาะของแกรนูล.....	65
4.3.2	การศึกษาสมบัติด้านความร้อนของแกรนูล.....	66
4.4	การศึกษาลักษณะเฉพาะของชิ้นงานกรีน อิทธิพลของ ความดันไอไซสแตติก และสมบัติของชิ้นงานก่อน HIP.....	69
4.4.1	การศึกษาอิทธิพลของความดันไอไซสแตติก ต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	69
4.4.2	การศึกษาสมบัติของชิ้นงานก่อนการ HIP.....	70
4.5	การเตรียมผลิตภัณฑ์ และอิทธิพลของอุณหภูมิการ HIP ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	75
4.5.1	ผลการศึกษาด้านความหนาแน่นและความแข็งของ ผลิตภัณฑ์ ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบการทดลอง.....	75
4.5.2	ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางฟิสิกส์ ของผลิตภัณฑ์.....	79
4.5.3	ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อโครงสร้าง จุลภาคและเฟส.....	82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.4 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์.....	90
4.5.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติ เชิงกลของผลิตภัณฑ์.....	90
4.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น โครงสร้าง จุลภาค และสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์.....	93
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	97
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลจากการทดลอง.....	105
ภาคผนวก ข. รายงานผลการวิเคราะห์ทดสอบ โดยสถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.....	120
ประวัติผู้เขียน.....	139

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสมบัติของซิลิคอนไนไตรต์.....	4
2.2 แสดงกระบวนการและขั้นตอนของเทคนิคการผลิตซิลิคอนไนไตรต์ ด้วยวิธีต่าง ๆ.....	9
2.3 แสดงสมบัติทั่วไปของผงซิลิคอนไนไตรต์ด้วยเทคนิคการผลิตต่าง ๆ.....	14
2.4 แสดงผลของสมบัติของผงวัสดุต่อกลไกการขึ้นเทอร์และสมบัติเชิงกล.....	17
2.5 แสดงสมบัติของแก้ว.....	29
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2 แสดงวัตถุประสงค์และสารเคมีสำคัญที่ใช้ในการทดลอง.....	39
33 แสดงสมบัติทั่วไปของซิลิคอนไนไตรต์.....	40
3.4 แสดงสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมออกไซด์.....	40
3.5 แสดงสมบัติทั่วไปของอิทเทรียมออกไซด์.....	41
3.6 แสดงการกำหนดตัวแปรและ level แบบ L_8	43
3.7 แสดงการกำหนดเงื่อนไขการทดลองแบบ L_8	43
3.8 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น สารปรับปรุงสมบัติ และสารเพิ่มการยึดเกาะ.....	46
3.9 แสดงส่วนผสมของสารเคลือบป้องกันปฏิกิริยา.....	49
3.10 แสดงส่วนผสมของแก้ว Pyrex [®]	50
4.1 แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงซิลิคอนไนไตรต์.....	55
4.2 แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงอะลูมิเนียมออกไซด์.....	60
4.3 แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงอิทเทรียมออกไซด์.....	60
4.4 แสดงสมบัติเฉพาะที่วัดได้ของชิ้นงานก่อน HIP.....	70
4.5 แสดงสมบัติด้านความหนาแน่นและความแข็งที่วัดได้ของผลิตภัณฑ์.....	75
4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่น สัมพันธ์กับตัวแปร.....	76
4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งสัมพันธ์ กับตัวแปร.....	77
4.8 แสดงความหมายของอักษรย่อที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนและไนโตรเจนของซิลิคอนไนไตรด์.....	106
ก.2 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนและไนโตรเจนของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว.....	106
ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอโซสแตติกที่ใช้อัดขึ้นรูปกับความหนาแน่นของชิ้นงานกรีนที่วัดได้.....	107
ก.4 แสดงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและมิติของชิ้นงานภายหลังการแคลไซน์เนชัน.....	108
ก.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX).....	109
ก.6 แสดงการหดตัวของผลิตภัณฑ์ภายหลังการ HIP.....	110
ก.7 แสดงข้อมูลความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์.....	111
ก.8 แสดงข้อมูลการวัดค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์.....	112
ก.9 แสดงค่า Young's modulus และ Fracture toughness ของผลิตภัณฑ์.....	113
ก.10 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติด้านความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เชิงสถิติ L_8	114
ก.11 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติด้านความแข็งของผลิตภัณฑ์เชิงสถิติ L_8	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างซิลิคอนไนไตรด์แบบแอลฟาและแบบเบตา.....	5
2.2 แสดงความดันไอของซิลิคอนที่สภาวะสมดุลกับซิลิคอนไนไตรด์.....	8
2.3 แสดงรูปแบบเทคนิคการผลิตซิลิคอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการ HIP แบบต่าง ๆ.....	10
2.4 แสดงแบบจำลองการเกิดสารละลายและการพรีซิพิตในการ ซินเทอร์แบบเกิดเฟสของเหลวของซิลิคอนไนไตรด์.....	11
2.5 แสดงความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป.....	21
2.6 แสดงแผนภาพการอัดขึ้นรูปแบบไอโซสแตติกประเภทแม่แบบ สัมผัสของเหลว.....	21
2.7 แสดงรูปแบบการควบคุมอุณหภูมิและความดัน.....	25
2.8 แสดงการทำแคปซูลแก้วแบบต่าง ๆ.....	28
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดของแก้ว.....	30
2.10 แสดงความเค้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดระหว่างช่วงการลดอุณหภูมิ.....	31
2.11 แสดงแบบจำลองการซินเทอร์ระหว่างอนุภาควงกลมจำนวน 2 วง.....	32
2.12 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวของรูช่องว่างภายในชิ้นงานและที่ผิว ของอนุภาค.....	34
2.13 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงผิวดูรูปของซิลิคอนไนไตรด์ระหว่างการ HIP.....	35
3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	42
3.2 แสดงระดับความดันและระยะเวลาของการอัดขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก.....	47
3.3 แสดงระดับอุณหภูมิและช่วงเวลาการใส่สารเพิ่มการยึดเกาะและ การแคลไซน์เนชัน.....	48
3.4 แสดงระดับอุณหภูมิและช่วงเวลาการเตรียมแคปซูล.....	51
4.1 แสดงรูปแบบพีค XRD ของผงซิลิคอนไนไตรด์.....	57
4.2 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงซิลิคอนไนไตรด์.....	58
4.3 แสดงภาพถ่ายผงซิลิคอนไนไตรด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องผ่าน.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงการกระจายขนาดของสารปรับปรุงสมบัติ.....	62
4.5 แสดงรูปแบบพีค XRD ของสารปรับปรุงสมบัติ.....	63
4.6 แสดงภาพถ่ายอนุภาคของสารปรับปรุงสมบัติจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	64
4.7 แสดงภาพถ่ายแกรนูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65
4.8 แสดงเทอร์โมแกรมของแกรนูล.....	67
4.9 แสดงเทอร์โมแกรมของสารเพิ่มการยึดเกาะ.....	68
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความดันไอโซสแตติกกับความหนาแน่น ของชิ้นงานที่ได้.....	69
4.11 แสดงภาพถ่ายผิวแตกของชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปภายใต้ ความดัน 250 เมกกะปาสคาล.....	71
4.12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างของแกรนูลเมื่อได้รับแรงอัด.....	72
4.13 แสดงรูปแบบพีค XRD ของชิ้นงานก่อนและหลังการแคลไซน์.....	73
4.14 แสดงระบบเฟสของ $\text{SiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-YN}$	74
4.15 แสดงกราฟของค่าเฉลี่ยของแฟคเตอร์ A ระหว่าง level 1 และ level 2 ของความหนาแน่น.....	76
4.16 แสดงกราฟของค่าเฉลี่ยของแฟคเตอร์ C ระหว่าง level 1 และ level 2 ของความหนาแน่น.....	77
4.17 แสดงกราฟของค่าเฉลี่ยของแฟคเตอร์ B ระหว่าง level 1 และ level 2 ของความแข็ง.....	78
4.18 แสดงกราฟของค่าเฉลี่ยของแฟคเตอร์ C ระหว่าง level 1 และ level 2 ของความแข็ง.....	78
4.19 แสดงกราฟร้อยละการหดตัวในแนวรัศมี ความสูง และแฟคเตอร์ การหดตัวเชิงเส้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	80
4.20 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ก่อนและหลัง HIP.....	81
4.21 แสดงกราฟความหนาแน่นทางทฤษฎีที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	81
4.22 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวก่อนกัดด้วยสารเคมี.....	83
4.23 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงระบบเฟสของสารปรับปรุงสมบัติที่ใส่ลงไป.....	86
4.25 แสดงภาพถ่ายผิวแตกของชิ้นงานภายหลังการ HIP.....	88
4.26 แสดงรูปแบบพีค XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP.....	89
4.27 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิการ HIP ระดับต่าง ๆ.....	91
4.28 แสดงค่า Young's modulus และ Fracture toughness.....	92
4.29 แสดงแฟคเตอร์การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานที่สภาวะต่าง ๆ.....	94
4.30 แสดงความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานที่สภาวะต่าง ๆ.....	94
4.31 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่สภาวะต่าง ๆ.....	95
4.32 แสดงค่า Young's modulus และ Fracture toughness ที่สภาวะต่าง ๆ.....	95
ก.1 แสดงรูปพีคผลการวิเคราะห์ห้องประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ ด้วย EDX.....	109
ก.2 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิ 1750 องศาเซลเซียส.....	116
ก.3 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิ 1850 องศาเซลเซียส.....	118
ก.4 แสดงรูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และเวลา ในการ HIP.....	119