


ผลของสารตัวเติมต่อการลดอุณหภูมิการขึ้นเทอร์ซิกอนคาร์ไบด์แบบไม่ใช้ความดัน



นายกานต์ เสรีวัลย์สถิตย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

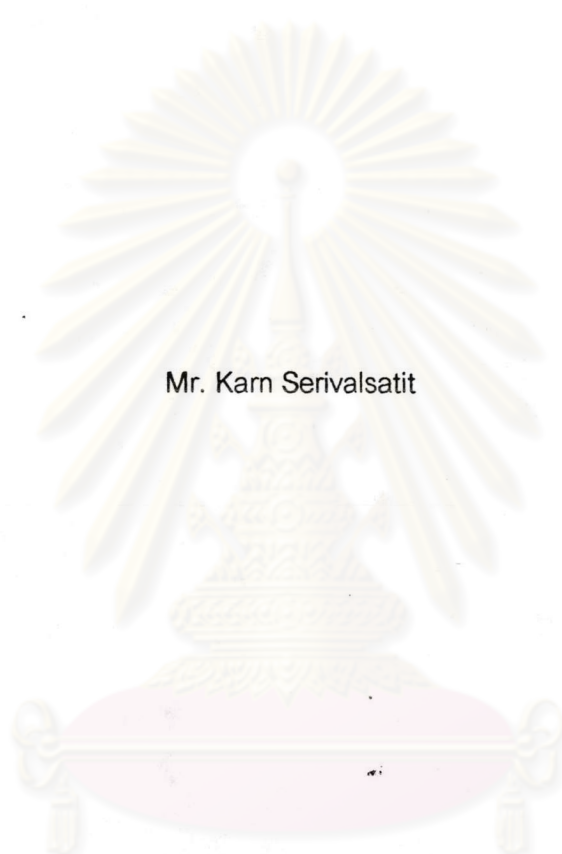
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1724-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ADDITIVES TO REDUCE PRESSURELESS SINTERING TEMPERATURE
OF SILICON CARBIDE



Mr. Karn Serivalsatit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Material Science

Faculty of Science

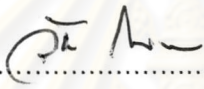
Chulalongkorn University

Academic Year 2002

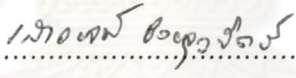
ISBN 974-17-1724-5

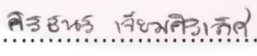
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารตัวเติมต่อการลดอุณหภูมิการขึ้นเทอรัซลิกอนคาร์ไบด์แบบ
ไม่ใช้ความดัน
โดย นายกานต์ เสรีวัลย์สถิตย์
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศิริพร ลามเกียรติถาวร

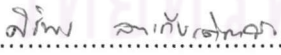
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

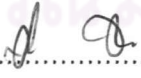

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เสาวรณย์ ช่วยจุลจิตร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ศิริพร ลามเกียรติถาวร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ชาน ชิเกตากะ วาตะ)

กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ : ผลของสารตัวเติมต่อการลดอุณหภูมิการซินเทอร์ซิงของซิลิกอนคาร์ไบด์แบบไม่ใช้ความดัน. (EFFECT OF ADDITIVES TO REDUCE THE PRESSURELESS SINTERING TEMPERATURE OF SILICON CARBIDE) อ. ที่ปรึกษา : ดร.ศิริพันธ์ เข็มศิริเลิศ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, 67หน้า. ISBN 974-17-1724-5.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารตัวเติมต่อการลดอุณหภูมิการซินเทอร์ซิงของซิลิกอนคาร์ไบด์แบบไม่ใช้ความดัน โดยใช้สารตัวเติม 4 กลุ่มได้แก่ อะลูมิเนียม-โบรอน-คาร์บอน แมกนีเซียมออกไซด์ อะลูมินา-อิทเทรีย และอะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียมออกไซด์ จากการทดลองพบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติมอะลูมินา-อิทเทรีย และอะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียมออกไซด์ สามารถซินเทอร์ได้ ชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงถึงร้อยละ 97 ของค่าความหนาแน่นเชิงทฤษฎี และยังใช้อุณหภูมิซินเทอร์ต่ำกว่าการใช้สารตัวเติมอะลูมิเนียม-โบรอน-คาร์บอน และแมกนีเซียมออกไซด์ สำหรับซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติมอะลูมินา-อิทเทรีย และอะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียมออกไซด์ การซินเทอร์ในช่วงอุณหภูมิ 1850 ถึง 1900 องศาเซลเซียส จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติมอะลูมินา-อิทเทรีย จะมีค่าความเค้นแรงดัดโค้ง 395 เมกะปาสคาล ค่าความแข็ง 1988 HV ขณะที่ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติมอะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียมออกไซด์ จะมีค่าความเค้นแรงดัดโค้ง 409 เมกะปาสคาล ค่าความแข็ง 1799 HV นอกจากนี้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติมสารตัวเติมทั้งสองกลุ่ม มีค่า Fracture Toughness มากกว่า $3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิติกร..... กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศิริพันธ์ เข็มศิริเลิศ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ศิริพร ลาภเกียรติถาวร

4372207923 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD: SILICON CARBIDE / SINTER / ADDITIVE / MECHANICAL PROPERTIES

KARN SERIVALSATIT : EFFECTS OF ADDITIVES TO REDUCE PRESSURELESS
SINTERING TEMPERATURE OF SILICON CARBIDE. THESIS ADVISOR :
SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., THESIS COADVISOR : SIRIPORN
LARPKIATTAWORN, Ph.D., 67 pp. ISBN 974-17-1724-5.

The objective of this research is to study the effects of additives on the pressureless sintering temperature of silicon carbide. The additives were aluminium-boron-carbon, magnesium oxide, alumina-yttria and alumina-yttria-calcium oxide. The results showed that sintered silicon carbide with the addition of alumina-yttria-calcium oxide give a high density (97% theoretical) at 1900°C which was higher than that of sintered silicon carbide with the addition of aluminium-boron-carbon or magnesium oxide at the same sintering temperature. Samples of silicon carbide with the addition of alumina-yttria had a bending strength of 395 MPa and a hardness of 1988 HV while those of silicon carbide with the addition of alumina-yttria-calcium oxide were 409 MPa and 1799 HV, respectively, and their values fracture toughness was higher than 3 MPa·m^{1/2}. Hence good mechanical properties were been found on these samples in the whole sintering range, 1850-1900°C.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department MATERIAL SCIENCE
Field of study CERAMIC TECHNOLOGY
Academic year 2002

Student's..... กานธี เจริญวงศ์พงษ์
Advisor's..... สิทธิชนิ์ จิเฒสิริลเธิ์
Co-advisor's..... สิทธิพน / อารีพนัฏฐเธิ์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร.ศิริชนว์ เจียมศิริเลิศ และ ดร.ศิริพร ลาภเกียรติถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำและ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยในทุกๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอำนวยความสะดวกในการใช้ เครื่องทดลองและวิเคราะห์ทดสอบตลอดโครงการ งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณ คุณชุมพล บุษบก คุณสมศรี ทวีถาวร คุณชนินทร์ สุหรัยนาถ คุณนิศยา แก้วแพรง ที่ให้การช่วยเหลือในการเตรียมและทดสอบชิ้นงาน

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และ น้องๆ ปริณญาโทที่คอยให้ความช่วยเหลือ และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกันด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์.....	3
2.2 กระบวนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์.....	5
2.2.1 Carbothermic Reaction.....	6
2.2.2 Polymer Conversion.....	8
2.2.3 Gas Phase Synthesis.....	8
2.3 การซินเทอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์.....	9
2.3.1 การซินเทอร์แบบใช้ความดัน.....	9
2.3.2 การซินเทอร์แบบไม่ใช้ความดัน.....	10
2.3.2.1 Solid State Sintered Silicon Carbide.....	10
2.3.2.2 Liquid Phase Sintered Silicon Carbide.....	14
2.4 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลของซิลิกอนคาร์ไบด์.....	17
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ.....	18
3.1.1 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค.....	19

3.1.2 การศึกษาลักษณะอนุภาค.....	19
3.1.3 การศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึก.....	19
3.2 การเตรียมส่วนผสมซิลิกอนคาร์ไบด์.....	19
3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	20
3.4 การฉินเทอร์.....	20
3.5 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติชิ้นงานที่เตรียมได้.....	21
3.5.1 ร้อยละของน้ำหนัที่หายไป.....	21
3.5.2 ร้อยละของการหดตัว.....	22
3.5.3 ความหนาแน่น.....	22
3.5.3.1 ความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	22
3.5.3.2 ความหนาแน่นเชิงทฤษฎี (Theoretical Density).....	23
3.5.3.3 ความหนาแน่นเชิงสัมพัทธ์ (Relative Density).....	24
3.5.4 ความทนแรงดัดโค้ง (Bending Strength).....	24
3.5.5 ความแข็ง (Hardness).....	26
3.5.6 Fracture Toughness.....	27
3.5.6.1 การหาอัตราส่วนของค่ายังสัมมูล์กับความแข็ง.....	27
3.5.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	28
4 ผลการทดลอง.....	29
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ.....	29
4.1.1 การกระจายขนาดของอนุภาค.....	29
4.1.2 ลักษณะอนุภาคของวัตถุดิบ.....	37
4.1.3 ลักษณะ โครงสร้างผลึกของวัตถุดิบ.....	37
4.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้.....	40
4.2.1 การศึกษาชนิดของสารตัวเติม.....	40
4.2.2 การศึกษาอุณหภูมิการฉินเทอร์.....	42
4.2.2.1 ร้อยละของน้ำหนัที่หายไป.....	42
4.2.2.2 ร้อยละของการหดตัว.....	44

4.2.2.3 ความหนาแน่น.....	45
4.2.2.4 ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี.....	46
4.2.2.4.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	46
4.2.2.4.2 การวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer.....	48
4.2.2.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy (EDS).....	49
4.2.2.5 ความทนแรงดัดโค้ง (Bending Strength).....	51
4.2.2.6 ความแข็ง (Vicker Hardness).....	52
4.2.2.7 Fracture Toughness.....	53
4.3 การวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานจากห้องตลาด.....	54
5 สรุปผลการทดลอง.....	58
รายการอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	67

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ Sika Tech #8000.....	18
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของสารตัวเติม.....	18
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของซิลิกอนคาร์ไบด์สูตรต่างๆ.....	20
ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ Sika Tech #8000.....	29
ตารางที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา.....	31
ตารางที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของอิทเทรีย.....	33
ตารางที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	35
ตารางที่ 4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่สารเติมตัวเติมชนิดต่างๆ.....	41
ตารางที่ 4.6 สมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย และ อะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียม ออกไซด์ หลังซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	42
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของ ชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย.....	50
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย แคลเซียมออกไซด์.....	50
ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่น ความแข็ง และ Fracture Toughness ของชิ้นงานจาก ที่องตลาค.....	54

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์	4
รูปที่ 2.2 การจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนคาร์ไบด์ในรูปแบบต่างๆ.....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเตา Acheson.....	6
รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและคาร์บอน.....	7
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง a. ปริมาณคาร์บอนกับความหนาแน่น b. ปริมาณโบรอนกับ ความหนาแน่น.....	10
รูปที่ 2.6 เฟสของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิต่างๆเมื่อเติมโบรอน A. อัลฟาซิลิกอน คาร์ไบด์ B. เบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์.....	11
รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ซินเทอร์ที่ 2090 องศาเซลเซียส.....	12
รูปที่ 2.8 ปริมาณเฟสที่ต่างกันเมื่อเติม โบรอนและอลูมิเนียม.....	13
รูปที่ 2.9 เฟสของเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เปลี่ยนไปที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อเติมอลูมิเนียม.....	13
รูปที่ 2.10 แผนภาพเฟสของอะลูมินาและอิทเทรีย.....	15
รูปที่ 2.11 แผนภาพเฟสของอิทเทรีย อะลูมินา และซิลิกา.....	16
รูปที่ 3.1 เครื่อง Hot press รุ่น High-Multi 500FV PHP-R-5 FRET-25.....	21
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการซินเทอร์.....	21
รูปที่ 3.3 ลักษณะ 4 – point bending.....	25
รูปที่ 3.4 รอยกดของหัวกดวิกเกอร์ส.....	26
รูปที่ 3.5 รอยกดของหัวกดคณูป.....	28
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ Sika Tech #8000.....	30
รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ Sika Tech #8000.....	30
รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของอะลูมินา.....	32
รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา.....	32
รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของอิทเทรีย.....	34
รูปที่ 4.6 การกระจายขนาดอนุภาคของอิทเทรีย.....	34
รูปที่ 4.7 การกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	36
รูปที่ 4.8 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	36
รูปที่ 4.9 ลักษณะของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ Sika Tech #8000 กำลังขยาย 10000 เท่า.....	37

รูปที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ XRD ของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ Sika Tech #8000.....	38
รูปที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ XRD ของผงอะลูมินา.....	38
รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ XRD ของผงอิทเทรีย.....	39
รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ XRD ของผงแคลเซียมคาร์บอเนต.....	40
รูปที่ 4.14 ความหนาแน่นเชิงเปรียบเทียบของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติมสารตัวเติมชนิด ต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนัที่หายไปกับอุณหภูมิซินเทอร์.....	43
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการหดตัวกับอุณหภูมิซินเทอร์.....	44
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงสัมพัทธ์กับอุณหภูมิซินเทอร์.....	45
รูปที่ 4.18 รอยแตกของชิ้นงานที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1850 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 5000 เท่า.....	46
รูปที่ 4.19 รอยแตกของชิ้นงานที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1950 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 5000 เท่า.....	46
รูปที่ 4.20 รอยแตกของชิ้นงานที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียมออกไซด์ ซินเทอร์ที่ อุณหภูมิ 1850 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 5000 เท่า.....	47
รูปที่ 4.21 รอยแตกของชิ้นงานที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียมออกไซด์ ซินเทอร์ที่ อุณหภูมิ 1950 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 5000 เท่า.....	47
รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1750 1850 และ 1950 องศาเซลเซียส.....	48
รูปที่ 4.23 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติม อะลูมินา-อิทเทรีย-แคลเซียม ออกไซด์ ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1750 1850 และ 1950 องศาเซลเซียส.....	49
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดัดโค้งกับอุณหภูมิซินเทอร์.....	51
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิซินเทอร์.....	52
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Fracture Toughness กับอุณหภูมิซินเทอร์.....	53
รูปที่ 4.27 รอยแตกของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์จากท้องตลาด Grade A กำลังขยาย 5000 เท่า	55
รูปที่ 4.28 รอยกุดจากหวัคควิเคอร์สบนชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์จากท้องตลาด Grade A กำลังขยาย 200 เท่า.....	55
รูปที่ 4.29 รอยแตกที่เกิดจากหวัคควิเคอร์สบนชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์จากท้องตลาด Grade A กำลังขยาย 1000 เท่า.....	56

รูปที่ 4.30 รอยกดจากหัวควิกเกอร์สบนชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เดิม อะลูมินา-อิทเทรีย ซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ 1850 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 200 เท่า.....	56
รูปที่ 4.31 รอยแตกที่เกิดจากหัวควิกเกอร์สบนชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เดิม อะลูมินา- อิทเทรีย ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1850 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า.....	57



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย