

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ โดยการอัดขึ้นรูปด้วยความดัน  
ที่เท่ากันทุกทิศทางภายใต้อุณหภูมิสูง



นาย สุขเกษม กังวานตระกูล

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-265-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17589290

**FABRICATION OF  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC COMPOSITES  
BY HOT ISOSTATIC PRESSING**

**Mr. Sukasem Kangwantrakool**

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

**Department of Materials Science**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1997**

**ISBN 974-687-265-8**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททานเนียมคาร์ไบด์โดยการอัดขึ้นรูปด้วยความดันที่เท่ากันทุกทิศทางภายใต้อุณหภูมิสูง

โดย

นาย สุขเกษม กังวานตระกูล

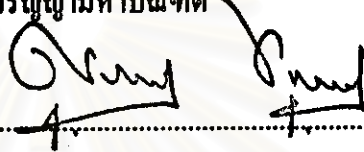
ภาควิชา

วัสดุศาสตร์

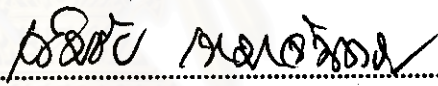
อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุดตมะสิต


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

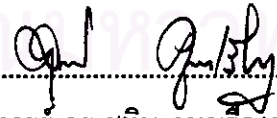
  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์นายแพทย์ สุภาวัฒน์ ชุตินวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุดตมะสิต)

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

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุทิน กุหาเรืองรอง)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

สุขเกษม กังวานตระกูล : การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์โดยการอัดขึ้นรูปด้วยความดันที่เท่ากันทุกทิศทางภายใต้อุณหภูมิสูง (FABRICATION OF  $Al_2O_3$ -TiC COMPOSITES BY HOT ISOSTATIC PRESSING) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. เล็ก อุตตะมะสิด, 197หน้า. ISBN 974-637-265-3

การศึกษาและการวิจัยการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ โดยการอัดขึ้นรูปด้วยความดันที่เท่ากันทุกทิศทางภายใต้อุณหภูมิสูงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และเวลา ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้อัตราส่วนระหว่างอะลูมินา และ ไททาเนียมคาร์ไบด์ ในปริมาณร้อยละ 70 และ ร้อยละ 26 ตามลำดับ เป็นสารตั้งต้น ใช้เซอร์โคเนียมออกไซด์ร้อยละ 4 เป็นสารปรับปรุงสมบัติเชิงกล ทำการเผาผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1900 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นทางทฤษฎีสามารถนำไปอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Isostatic Pressing (HIP) แบบไม่ต้องใช้แคปซูล เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น

ผลการทดลองพบว่า การ HIP ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (160 เมกกะปาสคาล) เวลา 60 นาที ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมสามารถทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 99 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี มีค่าความทนต่อการดัดโค้งเท่ากับ 450.303 เมกกะปาสคาล ค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 454.613 จิกะปาสคาล ค่าความแข็งเท่ากับ 23.732 จิกะปาสคาล และ ค่าความเหนียวเท่ากับ 4.3 เมกกะปาสคาล.เมตร<sup>1/2</sup>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วัสดุศาสตร์ .....  
สาขาวิชา ..... เทคโนโลยีเซรามิก .....  
ปีการศึกษา ..... 2540 .....

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C826329 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD:

ALUMINA / TITANIUM CARBIDE / COMPOSITES / SINTERING / HOT ISOSTATIC PRESSING

SUKASEM KANGWANTRAKOOL : FABRICATION OF  $Al_2O_3$ -TiC

COMPOSITES BY HOT ISOSTATIC PRESSING. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF.

LEK UTTAMASIL, Ph.D. 197 pp. ISBN 974-637-265-3

The densification of  $Al_2O_3$ -TiC composites was carried out by Hot Isostatic Pressing (HIP). The purpose of this investigation is to study the effect of temperature, pressure, and soaking time on the mechanical properties.  $Al_2O_3$  and TiC raw powders were used as starting materials at the ratio 70 : 26 %wt with an addition of 4 wt%  $ZrO_2$ . The green compacts were sintered at  $1900^\circ C$  before HIP in order to get the pre-sintered specimens having density more than 95 %Theoretical density. These specimens could be hot isostatically pressed without encapsulation. The pre-sintered step increased the density and improved mechanical properties.

The results of this research showed that the most suitable condition giving the best quality of products was operated under the pressure of  $1600 \text{ kg/cm}^2$  (160 MPa) at  $1650^\circ C$  for 60 min. The specimens having density more than 99 %Theoretical density, flexural strength 450.303 MPa, Young's modulus 454.613 GPa, hardness 23.732 GPa, and fracture toughness  $4.3 \text{ MPa.m}^{1/2}$  were obtained.

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วัสดุศาสตร์

สาขาวิชา..... เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุดมมะสิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์, อาจารย์ ดร.สุทิน กุหาเรืองรอง และ รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- อาจารย์ ดร.สมนึก ศิริสุนทร, อาจารย์ ดร.รัฎฐิมา มานะเลิศ, ดร.สุธี วัฒนศิริเวช นักวิจัยประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และ สิ่งแวดล้อม ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ

- คุณศิริพรรณ นิลโพธิ์ หัวหน้าฝ่ายวิจัยเซรามิก สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำปรึกษาและให้โอกาสดับผู้วิจัยในการทำวิจัยอย่างดียิ่งตลอดมา

- เพื่อนร่วมงานในสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และ ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

- คุณภัทรารรรณ กะหวงศ์ คุณเกศรินทร์ หิมรักษา และ คุณศิริรัตน์ รัตนจันทร์ เพื่อนร่วมเรียนระดับปริญญาโทที่ให้กำลังใจ และ ให้คำปรึกษามาโดยตลอด

- คุณชุมพล บุษบก นักวิชาการประจำสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งประเทศไทย และ คุณบุญเหลือ เงามารชัย นักวิทยาศาสตร์ประจำศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

- และขอขอบคุณ ภรรยา และ บุตร ที่คอยดูแลให้กำลังใจมาโดยตลอดจนสำเร็จ การศึกษาสมตามเจตนารมณ์

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ถ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.2 ความสำคัญหรือประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 วารสารปริทัศน์.....	5
2.1 ความเป็นมาและวิวัฒนาการของ เซรามิกสำหรับงานตัดแต่ง.....	5
2.2 กระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	8
2.2.1 การเผาผนึกโดยอาศัยการเผาไหม้ด้วยตนเองภายใต้อุณหภูมิสูง.....	9
2.2.2 การเผาผนึกโดยไม่ใช้ความดัน.....	11
2.2.3 การอัดขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน.....	11
2.2.4 การอัดขึ้นรูปแบบใช้ความดันที่เท่ากันทิศทางโดยใช้ความร้อน.....	11
2.3 สารปรับปรุงสมบัติ.....	23
2.4 สารช่วยยับยั้งในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง อะลูมินา กับ ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	24
2.5 สมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	25
2.5.1 สมบัติความทนต่อแรงดึง.....	25
2.5.2 สมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูง.....	29
2.6 ผลของปริมาณไททาเนียมคาร์ไบด์ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	30
2.6.1 สมบัติความยืดหยุ่น.....	30
2.6.2 ค่าความหนาแน่น.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 สมบัติความเหนียว.....	31
2.7 โครงสร้างจุลภาค.....	32
2.8 ภาวะของการตกค้างผิวหน้าหลังการเผาผนึกชิ้นงาน อะลูมินา และ วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อความแข็งแรง.....	33
2.9 การวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าความแข็งแรงของอะลูมินาและ วัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	35
2.10 ทฤษฎี.....	37
2.10.1 แบบจำลองการเกิดความหนาแน่นด้วยความดัน.....	37
2.10.2 สมการอัตราการเกิดความหนาแน่น.....	40
2.11 ผลของภาวะของกระบวนการ HIP.....	44
2.12 กลไกการเกิดความหนาแน่นของกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก(CIP).....	46
<b>3 วัสดุ และ วิธีการทดลอง.....</b>	<b>52</b>
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	52
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	53
3.2.1 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์.....	53
3.2.2 ผงไททาเนียมคาร์ไบด์.....	54
3.2.3 สารปรับปรุงสมบัติ.....	54
3.2.4 สารเพิ่มการยึดเกาะ.....	54
3.2.5 สารป้องกันปฏิกิริยา.....	54
3.3 วิธีการทดลอง.....	55
3.3.1 การออกแบบการทดลอง.....	56
3.3.2 การเตรียมผงตัวอย่างและการตรวจสอบสมบัติผงตัวอย่าง.....	57
3.3.2.1 การเตรียมผงตัวอย่าง.....	57
3.3.2.2 การตรวจสอบลักษณะจำเพาะของสารตั้งต้น.....	59
3.3.3 การขึ้นรูปและสมบัติก่อนเผาผนึกของตัวอย่าง.....	66



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.1 การขึ้นรูป.....	66
3.3.3.2 การตรวจสอบสมบัติก่อนเผาผนึกของตัวอย่าง.....	71
3.3.4 การเผาผนึก (Sintering).....	72
3.3.4.1 การตรวจสอบสมบัติหลังการเผาผนึกของตัวอย่าง.....	74
ก. การตรวจสอบสมบัติฟิสิกส์ของตัวอย่าง.....	74
ข. การตรวจสอบสมบัติเคมีของตัวอย่าง.....	75
ค. การตรวจสอบสมบัติเชิงกล.....	75
ง. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	81
3.3.5 การเผาผนึกโดยวิธี Hot Isostatic Pressing (HIP).....	83
3.3.5.1 การตรวจสอบสมบัติจำเพาะของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง.....	85
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	86
4.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของสารตั้งต้น.....	86
4.1.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงอะลูมินา.....	86
4.1.1.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงอะลูมินา.....	87
4.1.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมินา.....	88
4.1.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา.....	89
4.1.1.4 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงอะลูมินา.....	90
4.1.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงอะลูมินา.....	91
4.1.2 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	92
4.1.2.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	92
4.1.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	93
4.1.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	94
4.1.2.4 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	95
4.1.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	96
4.2 การศึกษาลักษณะจำเพาะของสารปรับปรุงสมบัติ.....	98
4.2.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	98

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	98
4.2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	99
4.2.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	100
4.2.1.4 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	101
4.2.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	102
4.3 การศึกษาลักษณะจำเพาะของสารเพิ่มการยึดเกาะ.....	103
4.4 การศึกษาลักษณะจำเพาะของแกรนูล.....	104
4.4.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงแกรนูล.....	104
4.4.2 การวิเคราะห์ทางเฟสของผงแกรนูล.....	105
4.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงแกรนูล.....	106
4.4.4 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและการกระจายขนาดของผงแกรนูล.....	107
4.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงแกรนูล.....	110
4.5 การศึกษาลักษณะจำเพาะของชิ้นงานกรีน ผลของความดัน การอัดชิ้นงานรูป แบบเย็น ผลของความดันไอโซสแตติก และ สมบัติของชิ้นงานก่อนการเผาผนึก.....	111
4.5.1 การศึกษาผลของความดันการขึ้นรูปแบบเย็น ต่อ ความหนาแน่นชิ้นงานกรีน.....	111
4.5.2 การศึกษาผลของความดัน การขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก (CIP) ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานกรีน.....	113
4.6 การศึกษาลักษณะจำเพาะและสมบัติของชิ้นงานผ่านการเผาผนึก ผลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราการให้ความร้อน.....	115
4.6.1 การวิเคราะห์ทางเฟสของชิ้นงานผ่านการเผาผนึก.....	115
4.6.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานผ่านการเผาผนึก.....	117
4.6.2 ผลของอัตราความร้อนในการเผาผนึกต่อสมบัติชิ้นงานก่อนการ HIP.....	117
4.6.3 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเผาผนึกก่อนการ HIP.....	120

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 ผลของอุณหภูมิ ความดัน เวลา ของการ HIP ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	120
4.7.1 ผลการศึกษา ผลของอุณหภูมิของการ HIP	
ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	120
4.7.1.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์.....	120
4.7.1.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งและความเหนียว.....	122
4.7.1.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีต่อ ค่าความทนต่อการคดโค้ง (Flexural Strength) และ ค่าโมดูลัสของยัง (E).....	124
4.7.1.4 ผลการศึกษา ผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค และ เฟส.....	125
4.7.1.5 ผลการศึกษา ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเฟส.....	129
4.7.2 ผลการศึกษา ผลของความดันของ HIP ต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	132
4.7.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน กับความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์.....	132
4.7.2.2 ผลการศึกษา ผลของความดันที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค.....	133
4.7.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความดันกับความแข็ง และความเหนียว.....	134
4.7.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความดันกับความทนต่อการคดโค้ง และ ค่าโมดูลัสของยัง.....	136
4.7.3 ผลการศึกษา ผลของเวลาเผาแช่ (Soaking Time) ในการ HIP	
ต่อ สมบัติของผลิตภัณฑ์.....	137
4.7.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเผาแช่ กับ ความหนาแน่นของชิ้นงาน HIP.....	137
4.7.3.2 ผลการศึกษาผลของเวลาเผาแช่ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค.....	138
4.7.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความดัน กับ ความแข็งแรงและความเหนียว.....	140

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของเวลาเผาแช่ กับ ความทนต่อการคั่วคั่ว และ ค่าโมดูลัสของแข็ง.....	141
4.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาวะการทดลอง และ สมบัติเชิงกล ของผลิตภัณฑ์.....	142
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	146
รายการอ้างอิง.....	149
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. แสดงข้อมูลจากการทดลอง.....	153
ภาคผนวก ข. แสดงผลการทดสอบ และ วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์.....	172
ประวัติผู้เขียน.....	197

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของ อะลูมินา (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) และ อะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	2
2.1 แสดงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ.....	14
2.2 ภาวะการใช้งานของ HIP สำหรับวัสดุเซรามิก.....	16
2.3 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ.....	17
2.4 แสดงผลกระทบจากการใช้ผงฝึกลบชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	21
2.5 แสดงสารปรับปรุงสมบัติชนิดต่างๆที่ใช้กับวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	24
2.6 สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการ Hot-Pressing.....	25
2.7 แสดงอัตราส่วนระหว่าง อะลูมินา กับ ไททาเนียมคาร์ไบด์ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นและความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	32
2.8 แสดงสมบัติเชิงกลของ อะลูมินา และ วัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	36
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	52
3.2 แสดงวัตถุประสงค์และสารเคมีสำคัญที่ใช้ในการทดลอง.....	53
3.3 แสดงการกำหนดเงื่อนไขและภาวะการทดลอง.....	56
3.4 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น สารปรับปรุงสมบัติ และสารเพิ่มการยึดเกาะ.....	57
3.5 อัตราส่วนผสมของสารฝึกลบป้องกันปฏิกิริยา.....	73
4.1 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงอะลูมินา.....	86
4.2 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงไททาเนียมคาร์ไบด์.....	92
4.3 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	98
4.4 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงแกรนูล.....	104
4.5 แสดงผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของเฟสในรูปแบบพีด XRD ของผงแกรนูล.....	106

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงแกรนูล.....	106
4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของผงแกรนูลที่ใช้ เวลาบดต่างกัน.....	107
4.8 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานเมื่อใช้ความดันในการขึ้นรูปต่างๆกัน.....	111
4.9 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานกรีนเมื่อใช้ความดันแบบไอโซสแตติก ในการขึ้นรูปต่างๆกัน.....	113
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับอัตราความร้อน ในการเผาผลาญ.....	118
4.11 แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเผาผลาญก่อนการ HIP.....	120
4.12 แสดงค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงาน HIP.....	121
4.13 แสดงค่าความแข็งและความเหนียวที่อุณหภูมิต่างๆของชิ้นงาน HIP.....	122
4.14 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงาน HIP.....	125
4.15 แสดงค่าความหนาแน่นที่ความดันต่าง ๆ ของชิ้นงาน HIP.....	132
4.16 แสดงค่าความแข็งและความเหนียวของชิ้นงาน HIP ที่ความดันต่าง ๆ.....	135
4.17 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงาน HIP ที่ความดันต่าง ๆ.....	136
4.18 แสดงค่าความหนาแน่นที่เวลาเผาแช่ต่าง ๆ ของชิ้นงาน HIP.....	137
4.19 แสดงค่าความแข็งและความเหนียวของชิ้นงาน HIP ที่เวลาต่างๆ.....	140
4.20 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงานHIPที่เวลาต่างๆ.....	141
ก. 1 แสดงการหดตัวของผลิตภัณฑ์ภายหลังการ HIP.....	154
ก. 2 แสดงการหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาผลาญ.....	154
ก. 3 แสดงข้อมูลความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์.....	155
ก. 4 แสดงข้อมูลค่าความทนต่อการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์.....	156
ก. 5 แสดงข้อมูลค่าโมดูลัสของยัง ของผลิตภัณฑ์.....	157
ก. 6 แสดงข้อมูลค่าความแข็งวิกเกอร์ส( $H_v$ )ของผลิตภัณฑ์.....	158
ก. 7 แสดงข้อมูลค่าความเหนียว (Fracture Toughness, $K_{IC}$ )ของผลิตภัณฑ์.....	159

ก. ๘ แสดงข้อมูลสมบัติของผลิตภัณฑ์.....160



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือสำหรับงานตัดแต่ง.....	3
2.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของ $Al_2O_3$ กับ TiC .....	7
2.2 แสดงกลไกของการเกิดความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ .....	8
2.3 แสดงผิวหน้ารอยแตกของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียม.....	9
2.4 แสดงรอยแตกที่เกิดจากการวัดความแข็งด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์ส.....	9
2.5 การเปรียบเทียบอายุการใช้งาน (Tool life) ของเครื่องมือสำหรับงานตัดแต่งที่ได้จาก HIP กับ Hot Pressing.....	14
2.6 แสดงค่าความแข็งแรงในทิศทางต่างๆของชิ้นงานซิลิกอน ไนไตรด์ที่ผ่าน การ Hot Pressing.....	15
2.7 ทิศทางแรงที่กระทำกับชิ้นงานของ HIP, Hot pressing.....	16
2.8 ความดันย่อยสมดุลย์ของส่วนที่เป็นแก๊สในระบบของ Al - O -TiC.....	19
2.9 ความดันย่อยสมดุลย์ของส่วนที่เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์(CO) ในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	20
2.10 แสดงภาพชิ้นงานด้านตัดขวาง(Cross Section)ซึ่งผ่านการขัดผิวหน้าแสดงให้เห็น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง $Al_2O_3$ และ TiC.....	20
2.11 แสดงการเกิดออกซิเดชันบนผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	22
2.12 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	26
2.13 แสดงค่า Stress- Strain Curves โดยใช้ความเร็วในการดึงคงที่ ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส.....	26
2.14 แสดงค่า Stress- Strain Curves ด้วยการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่างๆกัน.....	26
2.15 แสดงผลการวิเคราะห์จากเครื่องเอ็กซเรย์ดีฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) ของชิ้นงานที่ ใช้ความเร็วในการดึง เท่ากับ $1.19 \times 10^{-4}$ ค่อนาที ที่ 1550 องศาเซลเซียส.....	27
2.16 แสดงผลการวิเคราะห์จากเครื่องเอ็กซเรย์ดีฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) ของชิ้นงานก่อน การทดสอบแรงดึง.....	27
2.17 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ที่ได้จกกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	28



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงความแข็งที่อุณหภูมิสูง (Hot Hardness) ของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเครื่องมือ สำหรับงานตัดแต่ง.....	29
2.19 แสดงค่าความหนาแน่น และ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ ที่มีปริมาณไททาเนียมคาร์ไบด์ ต่าง ๆ กัน.....	30
2.20 แสดงค่าความเหนียว (Fracture Toughness) ตามปริมาณของไททาเนียมคาร์ไบด์.....	31
2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียว ( $K_{IC}$ ) กับปริมาณของไททาเนียมคาร์ไบด์.....	31
2.22 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	33
2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบของผิวหน้า (Surface Roughness) กับ ความแข็งแรง.....	34
2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสลิ่งกับความแข็งแรง.....	34
2.25 กราฟแสดงการกระจายตัวแบบไวบูลล์(Weibull Distribution)ของ ค่าความทนต่อการดัดโค้งของ อะลูมินา และ วัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์.....	35
2.26 แสดงแบบจำลองการเกิดความหนาแน่นด้วยความดันของอนุภาคทรงกลม.....	38
2.27 แสดงลักษณะของอนุภาค tetrakai-decahedron ที่มีรูกลมอยู่บริเวณมุมทั้ง 24 มุม.....	40
2.28 แสดงผลของอุณหภูมิและความดันของ HIP ที่มีต่อความหนาแน่นและ สมบัติเชิงกล.....	44
2.29 แสดงผลของการเลือกใช้บรรยากาศในการเผาผนึกซิลิคอนคาร์ไบด์ ก่อน HIP และหลัง HIP.....	45
2.30 แสดงผลของเวลาที่ใช้ในการ HIP ที่มีต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	45
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับแรงดันของ CIP.....	46
2.32 แสดงแบบจำลองของการเปลี่ยนรูปของอนุภาคจาก Sphere มาเป็น Dodecahedron ของ CIP.....	47
2.33 แสดงความสัมพันธ์ของ Kawakita ของ โลหะผงในอัตราส่วนผสมที่มีขนาดเดียว.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.34 แสดงความสัมพันธ์ Konopicky-Shapiro ของโลหะผงในอัตราส่วนผสมที่มี ขนาดเดียว (Monosize).....	51
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	55
3.2 ขอบคดพอลิโพรพิลีน และ ลูกบดอะลูมินา.....	58
3.3 เครื่องบดความเร็วต่ำแบบราง.....	58
3.4 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเม็ดสาร.....	60
3.5 เครื่องวัดพื้นที่ผิวของสาร (Surface Area), BET.....	61
3.6 เครื่อง X-ray Diffraction, XRD.....	63
3.7 เครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS.....	64
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65
3.9 เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) และ Thermo Gravimetric Analysis(TGA).....	66
3.10 เครื่อง Hydraulic Press.....	67
3.11 ลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว.....	68
3.12 แสดงชิ้นงานกรีนก่อน - หลังห่อหุ้ม.....	69
3.13 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบให้ความดันเท่ากันทุกทิศทางแบบไม่เผา.....	70
3.14 แสดงระดับความดัน และระยะเวลาของการอัดขึ้นรูปแบบ CIP.....	70
3.15 เตาเผาอุณหภูมิสูง 2400 องศาเซลเซียส.....	72
3.16 การบรรจุชิ้นงานกรีนเพื่อเตรียมการเผาผนึก.....	73
3.17 แสดงระดับอุณหภูมิและช่วงเวลาการเผาผนึก.....	74
3.18 เครื่องตัดใบตัดเพชรความเร็วสูง.....	76
3.19 เครื่อง Universal Testing Machine, UTM.....	77
3.20 เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาค.....	79
3.21 แสดงรอยแตกค้างเนื่องจากหัวกดวิกเกอร์สบนผิววัสดุ.....	80
3.22 เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุน.....	81
3.23 แผนผังแสดงการกัดผิวหน้าตัวอย่างด้วยวิธีเคมีความร้อน.....	82
3.24 กราฟแสดงภาวะการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 เครื่อง Hot Isostatic Press (HIP).....	85
4.1 แสดงรูปแบบพิก XRD ของผงอะลูมินา.....	87
4.2 แสดงรูปแบบพิก EDS ของผงอะลูมินา.....	88
4.3 แสดงภาพถ่ายผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	89
4.4 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงอะลูมินา.....	90
4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของผงอะลูมินา.....	91
4.6 แสดงรูปแบบพิก XRD ของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	93
4.7 แสดงรูปแบบพิก EDS ของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	94
4.8 แสดงภาพถ่ายผงไททานเนียมคาร์ไบด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	95
4.9 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผง ไททานเนียมคาร์ไบด์.....	96
4.10 แสดงผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงไททานเนียมคาร์ไบด์.....	97
4.11 แสดงรูปแบบพิก XRD ของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	99
4.12 แสดงรูปแบบพิก EDS ของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	100
4.13 แสดงภาพถ่ายผงเซอร์โคเนียมออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	101
4.14 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	102
4.15 ผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	103
4.16 แสดงผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงโพลีไวนิลแอลกอฮอล์.....	104
4.17 แสดงพิก XRD ของผงแกรนูล.....	105
4.18 แสดงรูปแบบพิก EDS ของผงแกรนูล.....	107
4.19 แสดงรูปแบบการกระจายของผงแกรนูลขนาดแบบปริมาณสะสมใช้เวลาบด 2 ชั่วโมง.....	108
4.20 แสดงรูปแบบการกระจายขนาดของผงแกรนูลแบบปริมาณสะสมใช้เวลาบด 30 ชั่วโมง.....	108
4.21 แสดงภาพถ่ายเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างและขนาดของผงแกรนูลที่ใช้เวลาบดต่างกัน.....	109
4.22 แสดงผลวิเคราะห์ทางความร้อนของผงแกรนูล.....	110
4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานกรีนกับความดันที่ใช้ใน การขึ้นรูป.....	112
4.24 ภาพถ่ายฝักรอยแตกของชิ้นงานกรีนที่ผ่านการขึ้นรูปแบบเย็น.....	112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานกรีนกับความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก.....	113
4.26 ภาพถ่ายผิวรอยแตกของชิ้นงานกรีนที่ผ่านการขึ้นรูปเพิ่มความหนาแน่นด้วย CIP.....	114
4.27 แสดงรูปแบบพีก XRD ของชิ้นงานผ่านการเผาผนึก.....	115
4.28 แสดงเฟสไดอะแกรมของ Zr-O.....	116
4.29 แสดงรูปแบบพีก EDS ของชิ้นงานผ่านการเผาผนึก.....	117
4.30 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับอัตราความร้อนในการเผาผนึกชิ้นงานก่อนการ HIP.....	118
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงาน HIP.....	122
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความแข็งและความเหนียวของชิ้นงาน HIP.....	123
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความทนต่อการดัดโค้งและค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงาน HIP.....	124
4.34 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส.....	125
4.35 แสดงรูปแบบพีก EDS ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP.....	126
4.36 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดผิวด้วยสารเคมีและความร้อน.....	127
4.37 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่ ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร.....	129
4.38 แสดงรูปแบบพีก XRD ของชิ้นงานผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เวลา 60 นาที.....	130
4.39 แสดงเฟสไดอะแกรมของอะลูมินา-เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> ).....	130
4.40 ไดอะแกรมของความดันและอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของเซอร์โคเนียมออกไซด์.....	131
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงาน HIP.....	132

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 แสดงภาพถ่ายโดยสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน ที่ผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ที่ความดันต่างๆ.....	134
4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับความแข็ง และความเหนียวของชิ้นงาน HIP.....	135
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับความทนต่อการดัดโค้งและ ค่าโมดูลัสของยัง.....	136
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาเผาแช่กับความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงาน HIP.....	138
4.46 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม /ตารางเซนติเมตร.....	139
4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลากับความแข็งและความเหนียวของชิ้นงาน HIP.....	140
4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลากับความทนต่อการดัดโค้งและ ค่าโมดูลัสของยัง ของชิ้นงาน HIP.....	141
4.49 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ.....	142
4.50 กราฟแสดงค่าความแข็ง (Hardness)ของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ.....	143
4.51 กราฟแสดงค่าความเหนียว (Fracture Toughness)ของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ.....	144
4.52 กราฟแสดงค่าความทนต่อการดัดโค้ง (Flexural Strength) ของชิ้นงานHIPที่ภาวะต่างๆ...145	145
4.53 กราฟแสดงค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของชิ้นงาน HIP ที่ภาวะต่างๆ.....	145
ก. 1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด ที่อุณหภูมิ HIP เท่ากับ 1450 องศาเซลเซียส.....	161
ก. 2 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด ที่อุณหภูมิ HIP เท่ากับ 1550 องศาเซลเซียส.....	163
ก. 3 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด ที่อุณหภูมิ HIP เท่ากับ 1650 องศาเซลเซียส.....	165
ก. 4 แสดงภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิ HIP เท่ากับ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน1600 กิโลกรัม/ตร.ซม. เวลา 60 นาที.....	167

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก. 5 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกักผิวหนังด้วย วิธีเคมีความร้อนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	168
ก. 6 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากห้องตลาดของบริษัท ก. (Japan) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	169
ก. 7 แสดงรูปแบบกราฟการเพิ่มอุณหภูมิ และ ระยะเวลาเผาแห้ง ที่ใช้ในการเผาผนึกชิ้นงาน ก่อนการ HIP ที่อุณหภูมิ 1900 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเผาแห้ง 120 นาที.....	170
ก. 8 แสดงรูปแบบกราฟการเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และ ระยะเวลาเผาแห้ง ที่ใช้ในการ HIP ที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส ความดัน 1600 กิโลกรัม/ตร.ซม. ระยะเวลาเผาแห้ง 60 นาที.....	171

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย