

สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ  
อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์



นางสาววรรษยา ไชยโคตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE  
OF  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$  COMPOSITES



Miss Varuchchaya Chaiyacote

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ  
อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

โดย

นางสาววรรษยา ไชยโคตร

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

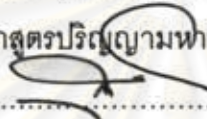
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์

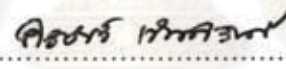
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


อาจารย์ ดร. ณัฏฐิตา ขวนเกริกกุล

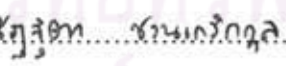
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ เจียมศิริเลิศ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร. ณัฏฐิตา ขวนเกริกกุล)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. จิราภรณ์ เชื้อชลิตานุกุล)

วิชา ไทยโคตร : สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/  
ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ MECHANICAL PROPERTIES AND  
MICROSTRUCTURE OF  $Al_2O_3/WC-Co$  COMPOSITES.อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก : อาจารย์ ดร.วันतीय พุกกะคุปต์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อาจารย์ ดร.  
ณัฐริตา ชวนเกริกกุล, 62 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุพื้นมีทังสเตนคาร์ไบด์  
และโคบอลต์เป็นอนุภาคเสริมแรง องค์ประกอบทางเคมีมีอะลูมินาเป็นหลัก 80 และ 90  
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีอัตราส่วนของทังสเตนคาร์ไบด์และ  
โคบอลต์ต่างกันในส่วนผสมที่มีอะลูมินา 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 10 เปอร์เซ็นต์โดย  
น้ำหนักของทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์มีโคบอลต์อยู่ 0.6 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก  
สำหรับส่วนผสมที่มีอะลูมินา 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของ  
ทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์นั้นจะมีโคบอลต์อยู่ 2 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมผง  
วัตถุดิบอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเป็นเม็ดกลมจากนั้นเผาผืนิกโดยไม่ใช้แรงดันในบรรยากาศ  
อาร์กอน ตัวแปรที่ทำการศึกษได้แก่ อุณหภูมิการเผาผืนิก และ องค์ประกอบทางเคมีที่  
แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากปริมาณของโคบอลต์ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ รวมไปถึง  
ถึงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิเผาผืนิกที่ 1600  
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่น ความแข็งแรง ความแข็ง และ  
ความเหนียวที่เหนือกว่าการเผาผืนิกที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส การเติมอนุภาคทังสเตน  
คาร์ไบด์และโคบอลต์ลงในอะลูมินาทำให้ความแข็งชิ้นงานอยู่ช่วง 17-20 GPa ความเหนียว  
เพิ่มขึ้นตามปริมาณของโคบอลต์ อยู่ในช่วง 5-10 MPa m<sup>1/2</sup>

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต..... วิชา ไทยโคตร  
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา 2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 5172434023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS :  $Al_2O_3$  / WC-Co COMPOSITES / PARTICULATE REINFORCEMENTS

VARUCHCHAYA CHAIYACOTE: MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF  $Al_2O_3$ /WC-Co COMPOSITES. ADVISOR : WANTANEE BUGGAKUPTA, Ph. D., CO-ADVISOR : NUTTHITA CHUANKRERKKUL, Ph. D., 62 pp.

This research involves the preparation of alumina-based composites reinforced by tungsten carbide and cobalt particles. Main chemical compositions of the composites contained 80wt% and 90wt% alumina while the rest were tungsten carbide and cobalt situated with various ratios. In the composites with 90wt% alumina, 10wt% of the reinforced particles consisted of cobalt from 0.6, 1 to 3wt%, meanwhile the batch with 80wt% alumina, 20 wt% of the reinforced particles comprised cobalt from 2, 4 to 6wt%. The powder mixtures were pressed into pellets, followed by pressureless sintered in argon, respectively. Parameters including sintering temperature and chemical compositions, based on cobalt content, which affected on mechanical and physical properties as well as microstructure were considered. The results suggested that the sintering temperature of 1600 °C for 2 hours provided superior density, strength, hardness together with toughness compared to those sintered at 1500 °C. The addition of tungsten carbide-cobalt particles into alumina enhanced toughness according to the amount of cobalt content. Hardness of the WC-Co containing products were in the range of 17-20 GPa whereas toughness were 5 -10 MPa m<sup>1/2</sup>.

Department : Materials Science.....

Field of Study : Ceramic Technology.....

Academic Year : 2010.....

Student's Signature *วริษฐา โสฬาม*

Advisor's Signature *Wantanee Buggakupta*

Co-advisor's Signature *Nutthita Chuankrerkkul*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนและช่วยเหลือในด้านวิชาการ การดำเนินการวิจัยจากบุคคลทั้งหลายและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร. ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำแนวทางการแก้ไข ปัญหาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาแนะนำแนะให้ความรู้ และแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ชิเกตากะ วาดะ ที่อนุเคราะห์ฝังอะลูมินา ดร. กุลจิรา สุจิโรจน์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่อนุเคราะห์ฝังทั้งสแตนคาร์ไบด์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่อนุเคราะห์พอลิไวนิลบิวทิลอล และกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูงสำหรับการสนับสนุนงานวิจัยและการศึกษา

ขอขอบคุณคุณวิรพงษ์ ครพนม และคุณธนากร เทพามาตย์ เจ้าหน้าที่ประจำเครื่องมือ XRD และ SEM ที่ช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณ พี่ๆ และ เพื่อนๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคน ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในการทดลองวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และ คุณแม่ ที่คอยให้การสนับสนุน และกำลังใจโดยตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุตัด.....	4
2.1.1 สมบัติของวัสดุตัด และวัสดุสำหรับเครื่องมือตัด.....	4
2.1.2 วัสดุตัดเซรามิก.....	6
2.2 วัสดุเชิงประกอบ.....	7
2.3 วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์.....	8
2.3.1 อะลูมินา.....	8
2.3.2 ทังสเตนคาร์ไบด์.....	10
2.3.3 โคบอลต์.....	10
2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบ.....	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	16
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	16
3.1.2 การวิเคราะห์วัตถุประสงค์เบื้องต้น.....	17
3.2 ขั้นตอนในการทดลอง.....	17
3.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	17
3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง.....	17

3.2.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	18
3.2.4. การเผาผนึก.....	18
3.2.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติและโครงสร้างจุลภาค.....	19
3.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของตัวอย่างชิ้นงาน.....	22
3.3.1 ความหนาแน่น .....	22
3.3.2 ความแข็งและความเหนียว .....	23
3.3.3 ความแข็งแรง .....	23
3.3.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค .....	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	25
4.1. ลักษณะเฉพาะของผงวัสดุดิบ.....	25
4.1.1 การกระจายขนาดอนุภาค .....	25
4.1.2 สัณฐานวิทยา .....	26
4.1.3 องค์ประกอบทางเฟส.....	28
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์- โคบอลต์.....	29
4.2.1 ความหนาแน่น.....	29
4.2.2 โครงสร้างจุลภาค .....	30
4.2.3 ความแข็ง .....	33
4.2.4 ความเหนียว .....	34
4.3 การเปรียบเทียบทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่เตรียมจากการผสมเองกับผงทังสเตน คาร์ไบด์ที่ผสมรวมกับโคบอลต์มาแล้วในทางการค้า .....	35
4.4 ผลของโคบอลต์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ .....	38
4.4.1 ความหนาแน่น.....	38
4.4.2 โครงสร้างจุลภาค .....	40
4.4.3 ความแข็ง .....	44
4.4.4 ความเหนียว .....	46
4.2.4 ความแข็งแรง.....	48
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	51



5.2 ข้อเสนอแนะ .....	50
รายการอ้างอิง .....	51
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก .....	56
ภาคผนวก ข .....	58
ภาคผนวก ค .....	60
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	62



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติของอะลูมินา .....	9
ตารางที่ 2.2 สมบัติของทั้งสแตนคาร์ไบด์ .....	10
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบอะลูมินา ทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ที่ใช้ในการ ทดลอง.....	18
ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนของ อะลูมินา วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์ และ วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ .....	33



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การพัฒนาวัสดุตัด ในช่วงเวลาต่างๆตามฟังก์ชันของความเร็วยอบในการตัด..... 5

รูปที่ 2.2 ความแข็งและความแข็งแรงของวัสดุตัด..... 6

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะลูมินา ..... 9

รูปที่ 2.4 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบจากงานวิจัยที่ผ่านมา ..... 12

รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดความเหนียวโดยการหักเหของรอยแตก (Crack deflection)..... 12

รูปที่ 2.6 ความแข็งแรงของวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ..... 13

รูปที่ 2.7 ความแข็งและความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ ..... 14

รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางภายในเรือนจับ..... 19

รูปที่ 3.2 แผนผังการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ..... 21

รูปที่ 4.1 (a) การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัสดุดิบ (b) การกระจายขนาดสะสมอนุภาค.....26

รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยา a) ผงอะลูมินา b) ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ c) ผง 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co.....27

รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของผงโคบอลต์.....28

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของผง 94wt% WC + 6wt% Co.....28

รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ที่องค์ประกอบเคมีต่างๆ a) 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 10wt% WC b) 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 9.4wt% WC + 0.6wt% Co c) 94wt% WC + 6wt% Co.....29

รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 1500 และ1600 องศาเซลเซียสของวัสดุเชิงประกอบที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ..... 30

รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 10wt% WC ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ a) 1500 องศาเซลเซียส b) 1600 องศาเซลเซียส.....32

รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ a) 1500 องศาเซลเซียส b) 1600 องศาเซลเซียส.....32

รูปที่ 4.9 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส ที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ .....34

รูปที่ 4.10 ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียสที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ .....35

- รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาค ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ของ  
 $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 9.4\text{wt}\% \text{WC} + 0.6\text{wt}\% \text{Co}$  สูตรที่ 2 ผสมผงวัตถุดิบทั้งสามเอง  
 เปรียบเทียบกับผสมผงวัตถุดิบทางการค้า.....36
- รูปที่ 4.12 ความหนาแน่น ความแข็ง และความเหนียว ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ของ  
 $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 9.4\text{wt}\% \text{WC} + 0.6\text{wt}\% \text{Co}$  สูตรที่ 2 ผสมผงวัตถุดิบทั้งสามเอง  
 เปรียบเทียบกับผสมผงวัตถุดิบทางการค้า.....37
- รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$  ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสที่  
 องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a)  $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{wt}\% \text{WC-Co}$   
 (b)  $80\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 20\text{wt}\% \text{WC-Co}$ ..... 39
- รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วย  $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{wt}\% \text{WC}$   
 a) จุดที่หาองค์ประกอบทางเคมี b) บริเวณอนุภาคสีสว่าง c) บริเวณเนื้อพื้นสีเทา....41
- รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วย  $94\text{wt}\% \text{WC} + 6\text{wt}\% \text{Co}$  a)  
 จุดที่หาองค์ประกอบทางเคมี b) บริเวณอนุภาคสีสว่าง c) บริเวณเนื้อพื้นสีเทา.....42
- รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ  $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 9.4\text{wt}\% \text{WC} + 0.6\text{wt}\% \text{Co}$   
 a) จุดที่หาองค์ประกอบทางเคมี b) บริเวณอนุภาคสว่าง c) บริเวณเนื้อพื้นสีเทา  
 d) บริเวณอนุภาคสีเทาสว่าง..... 43
- รูปที่ 4.17 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$  ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสที่  
 องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a)  $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{wt}\% \text{WC-Co}$   
 (b)  $80\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 20\text{wt}\% \text{WC-Co}$ .....45
- รูปที่ 4.18 ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$  ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสที่  
 องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a)  $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{wt}\% \text{WC-Co}$   
 (b)  $80\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 20\text{wt}\% \text{WC-Co}$ .....47
- รูปที่ 4.19 การเกิดการหักเหของรอยแตกของชิ้นงานเผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส  
 a)  $80\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 20\text{wt}\% \text{WC}$  b)  $80\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 14\text{wt}\% \text{WC} + 6\text{wt}\% \text{Co}$ .....48
- รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$  ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสที่  
 องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a)  $90\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{wt}\% \text{WC-Co}$   
 (b)  $80\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 20\text{wt}\% \text{WC-Co}$ .....49

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\bar{c}$	= ค่าเฉลี่ยเส้นแนวรอยแตกของรอยกด (เมตร)
$\bar{d}$	= ค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุมของรอยกด (มิลลิเมตร)
$H_v$	= ค่าความแข็งที่ได้จาก Vickers Indenter (จิกะพาสคัล)
$K_c$	= ค่าความเหนียวที่ได้จาก Vickers Indenter (เมกะพาสคัล เมตรกำลังหนึ่งส่วนสอง)
$L$	= ความกว้างของจตุรกรรรมรับตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
$P$	= น้ำหนักที่หกด (กิโลกรัม)
$P_f$	= แรงกระทำที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างแตกหัก (พาสคัล)
$\rho_a, \rho_b, \rho_c$	= ความหนาแน่นจริงของสารตั้งต้น $a$ , $b$ และ $c$ (กรัม)
$\rho_{bulk}$	= ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$\rho_{th}$	= ความหนาแน่นเชิงทฤษฎี (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$\rho_{water}$	= ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$t$	= ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
$W$	= ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
$W_a, W_b, W_c$	= น้ำหนักของสาร $a$ , $b$ และ $c$ ตามลำดับ (กรัม)
$W_{dry}$	= น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)
$W_{sat}$	= น้ำหนักของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)
$W_{sus}$	= น้ำหนักของชิ้นงานในน้ำ (กรัม)
$W_{total}$	= น้ำหนักรวมทั้งหมดของสารตั้งต้น
$\sigma_f$	= ความแข็งแรง (เมกะพาสคัล)

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีทางการแพทย์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมการผลิตล้นแล้วแต่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง ดังนั้นจึงมีการพยายามที่จะปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยเฉพาะขั้นตอนการตัดแต่งชิ้นงาน ขั้นตอนนี้ถือว่ามีความสำคัญเพราะต้องอาศัยเครื่องมือตัดที่มีความเที่ยงตรงสูงสำหรับตัดแต่งส่วนเกินของผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมการผลิตโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับโลหะจึงให้ความสำคัญและพัฒนาเครื่องมือตัดอย่างต่อเนื่อง<sup>(1)</sup>

มีวัสดุหลายชนิดในทางเซรามิกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานตัดแต่ง เช่น อะลูมินา ไนไตรต์ และคาร์ไบด์<sup>(2)</sup> อะลูมินาถือว่าประสบความสำเร็จมากในการนำมาใช้ตัดโลหะเนื่องจากอะลูมินามีความแข็งสูง และต้านทานต่อการสึกกร่อนได้ดี<sup>(3)</sup> อย่างไรก็ตามวัสดุอะลูมินานั้นยังขาดสมบัติทางความเหนียว<sup>(4)</sup> สิ่งที่จะช่วยได้ก็คือการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเตรียมวัสดุตัดจากวัสดุเชิงประกอบที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุพื้นอย่างหลากหลาย

วัสดุเชิงประกอบมีความสำคัญมากต่องานที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุตัด เนื่องจากเครื่องมือตัดที่มีประสิทธิภาพต้องใช้วัสดุที่สมบัติที่ดีทั้งด้านความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Toughness) ความแข็งแรง (Strength) ต้องเป็นวัสดุที่ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่อุณหภูมิสูง (High temperature resistance) และนอกจากนี้ต้องต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปได้ดี (High deformation resistance)<sup>(1)</sup> จึงยากที่จะหาวัสดุเพียงตัวเดียวที่มีสมบัติทั้งหมดตรงตามต้องการมาเตรียมเป็นวัสดุตัดได้

ทังสเทนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (ซีเมนเตตคาร์ไบด์) เป็นวัสดุเชิงประกอบที่น่าสนใจตัวหนึ่งที่ถูกเลือกนำมาใช้เป็นวัสดุตัดเนื่องจากมีความแข็ง (17-22.50 GPa) มีความแข็งแรง (2200 MPa) มีความเหนียวสูง (11-12 MPa<sup>1/2</sup>)<sup>(5)</sup> และยังต้านทานต่อการผุกร่อนได้ดี แม้ทังสเทนคาร์ไบด์-โคบอลต์จะมีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตัดแต่ก็มีบางส่วนที่ต้องปรับปรุงอยู่บ้างคือในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทังสเทนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสความแข็งแรงของคมตัดลดลงเนื่องจากการรวมตัวของสารประกอบทังสเทนคาร์ไบด์-โคบอลต์กับออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดความบวมพอง ในโครงสร้าง<sup>(6)</sup> ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยพยายามที่จะปรับปรุงการเตรียมวัสดุตัด โดยเลือกวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมมาเสริมสร้างทดแทน เช่น อะลูมินาเสริมแรงด้วยอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ อะลูมินาเสริมแรงด้วยทังสเทน-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และอะลูมินาเสริมแรงด้วยอนุภาคทังสเทนคาร์ไบด์ เป็นต้น<sup>(5,7)</sup> ซึ่งอะลูมินาจะช่วยปรับปรุงการต้านทานความ

ร้อนสูงและลดการสึกกร่อน ส่วนวัสดุเสริมแรงก็จะช่วยเสริมสร้างในด้านความแข็งแรงและความเหนียวบางส่วน จึงอาจมีความเป็นไปได้ว่าการเติมโคบอลต์ปริมาณเล็กน้อยน่าจะช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาและทังสเตนคาร์ไบด์ได้ สำหรับการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีวัสดุมากกว่า 2 ชนิด เช่นการเตรียมอะลูมินาเสริมแรงด้วยอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์มักใช้ผงสำเร็จรูปที่ผลิตจากโรงงาน ที่มีข้อจำกัดในเรื่องความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ เช่น ส่วนผสมทางเคมีที่มีค่อนข้างจำกัด อีกทั้งยังไม่มีการผลิตอย่างต่อเนื่องไม่เพียงพอตามความต้องการ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยการผสมอะลูมินาทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์จากผงวัตถุดิบทั้งสามเองอาจสามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุพื้น โดยมีทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์เป็นอนุภาคเสริมแรงโดยการผสมผงวัตถุดิบทั้งสามขึ้นเอง ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น อัตราส่วนระหว่างอะลูมินากับอนุภาคเสริมแรง ปริมาณโคบอลต์และอุณหภูมิในการเผา ต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง และความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบสำหรับประยุกต์ใช้เพื่องานวัสดุต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาและทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากการผสมจากทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์กับผงวัสดุทางการค้า

1.2.3 เพื่อศึกษาผลองค์ประกอบทางเคมีและตัวแปรการผลิตที่มีผลต่อสมบัติและโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียมและศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณโคบอลต์ในวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง และความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ

1.3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาผนึกช่วง 1500 - 1600 องศาเซลเซียส

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่มีสมบัติเชิงกลเหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้านวัสดุตัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

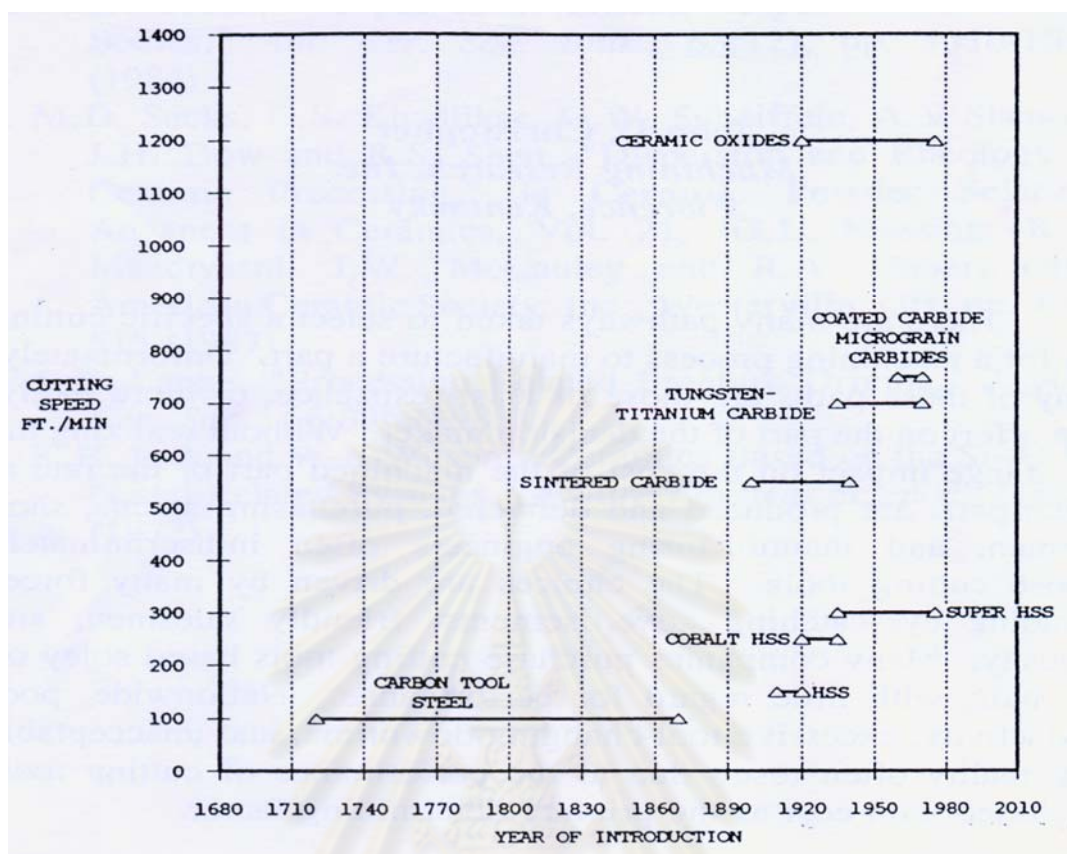
ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งมีหัวข้อหลักๆ ดังนี้คือ (1) วัสดุตัด (2) วัสดุเชิงประกอบ (3) วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ และ (4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแยกเนื้อหาตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 วัสดุตัด

วัสดุตัดมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันเพื่อให้ได้วัสดุตัดใหม่ที่มีสมบัติดีกว่าวัสดุตัดเดิมที่เคยใช้ เนื่องจากเครื่องจักรกลที่ใช้ในการตัดวัสดุมีการพัฒนามากขึ้นไม่ว่าจะเป็นการใช้งานด้วยความเร็วรอบสูงขึ้น การทำงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น วัสดุชนิดใหม่ๆ ได้รับการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้นและลดข้อจำกัดในการใช้งาน อีกทั้งมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าเดิม

##### 2.1.1 สมบัติของวัสดุตัด และวัสดุสำหรับเครื่องมือตัด

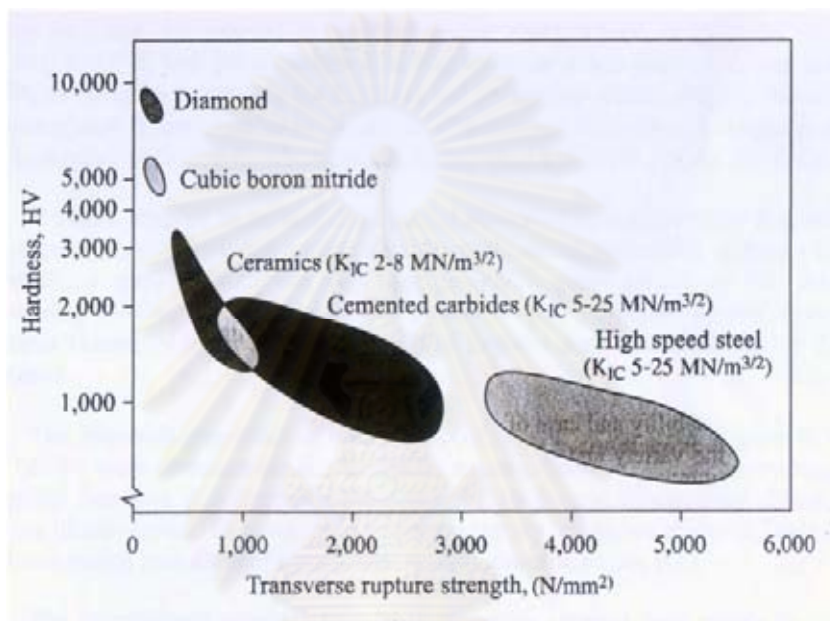
วัสดุที่ใช้เตรียมเป็นเครื่องมือตัดต้องมียสมบัติดังต่อไปนี้ มีความแข็งแรงสูง ทนทานไม่แตกหักง่าย มีความแข็งสูง คือที่อุณหภูมิห้องวัสดุสำหรับตัดต้องมีความแข็งสูง ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับชิ้นงานซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สึกหรอได้ง่าย นอกจากนี้ยังต้านทานต่อการสึกหรอได้ดี เนื่องจากที่บริเวณคมตัดจะมีการเสียดสีระหว่างมีดกับชิ้นงานซึ่งเป็นสาเหตุให้ใบมีดสึกหรอได้เร็ว มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง เพราะขณะที่ใบมีดกำลังตัดชิ้นงานการขัดสีทำให้อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นอาจทำให้ความแข็งลดลง ดังนั้นวัสดุที่เลือกมาจะต้องทนอุณหภูมิสูงได้โดยที่ยังคงความแข็งแรงไว้ ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำมีดตัด ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนธาตุผสมต่ำ (Plain carbon and low alloy steels) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High-speed steel, HSS) โลหะผสมโคบอลต์ (Cast cobalt alloys) ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented carbides) เซรามิก (Ceramics) เพชรสังเคราะห์ (Synthetic diamond) เป็นต้น ซึ่งมีการพัฒนาวัสดุตัดโดยพิจารณาจากความเร็วรอบในการตัด<sup>(1,8,9)</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การพัฒนาวัสดุตัด ในช่วงเวลาต่างๆ ตามความเร็วรอบในการตัด<sup>(1)</sup>

จากรูปสังเกตได้ว่าในอดีตวัสดุที่นิยมนำมาทำเครื่องมือตัดคือเหล็กกล้าเนื่องจากสมบัติที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance) แต่มีข้อด้อยคือความแข็งแรงลดลงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงและมีความเร็วรอบในการตัดต่ำ ต่อมามีการพัฒนาตามความเร็วรอบในการตัดมาใช้เหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed steel) มีสมบัติที่สามารถคงความแข็งของวัสดุได้ที่อุณหภูมิสูง วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำเครื่องมือตัดอีกชนิดหนึ่งก็คือโลหะหล่อผสมโคบอลต์ (Cast cobalt alloys) นิยมเรียกว่าสเทลไลท์ เป็นเหล็กหล่อผสมโคบอลต์ โครเมียม ทังสเทน เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงก็ยังคงความแข็งแรงไว้ได้ สำหรับซีเมนต์เตตคาร์ไบด์ (Cemented carbides) เซอร์เมท (Cermets) และ คาร์ไบด์เคลือบ (Coated Carbides) ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในปี ค.ศ.1930 เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของทังสเทนคาร์ไบด์ (WC) โดยมีโคบอลต์เป็นวัสดุประสานซึ่งสามารถใช้ในการตัดชิ้นงานเหล็กหล่อและชิ้นงานที่ไม่ใช่โลหะ เพราะสามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่ามีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูงและโลหะผสมโคบอลต์ นอกจากนี้วัสดุที่มีความแข็งที่สุดที่นิยมนำมาทำเครื่องมือตัดก็คือเพชร จากการวัดค่าความแข็งเพชรจะมีค่าความ

แข็งมากกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์และอะลูมินา (รูปที่ 2.2) เนื่องจากความแข็งเป็นคุณสมบัติสำคัญ ประการหลักของมิดดัดที่ดี ทำให้เพชรเป็นหนึ่งในวัสดุที่ถูกพิจารณานำมาใช้งาน จะนิยมใช้ในการ ตัดชิ้นงานที่ไม่ใช่เหล็กกล้าความเร็วสูงและใช้ขัดผิวชิ้นงานที่ไม่ใช่โลหะเช่น ไฟเบอร์กลาส (fiberglass) และกราไฟต์



รูปที่ 2.2 ความแข็งและความแข็งแรงของวัสดุตัด<sup>(10)</sup>

### 2.1.2 วัสดุตัดที่ทำจากเซรามิก

วัสดุตัดที่ทำจากเซรามิกเป็นวัสดุเครื่องมือตัดที่ผลิตจากอะลูมินา ส่วนผสมหลักของ วัสดุตัดเซรามิกคือ อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) นำมาใช้ในงานตัดความเร็วรอบสูงเนื่องจากมีความแข็งสูง และคงความแข็งได้ที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี แต่อย่างไรก็ตามเซรามิกมี ข้อด้อยคือเปราะ จึงทำให้ขอบเขตการทำงานถูกจำกัดในเรื่องของอัตราเร็วของการป้อนชิ้นงาน และระยะเวลาการป้อนชิ้นงาน<sup>(11)</sup> ปัจจุบันนี้มีการพัฒนาปรับปรุงวัสดุโดยการเตรียมเป็นวัสดุเชิง ประกอบโดยสามารถทำให้วัสดุตัดเซรามิกมีความแข็งและ ความเหนียวมากขึ้น รวมไปถึงมีอายุ การใช้งานที่นานกว่าคาร์ไบด์เนื่องจากทนต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดีกว่า<sup>(12)</sup> สำหรับเครื่องมือ ตัดที่ทำจากเซรามิกแบ่งออกเป็น

(1) เครื่องมือตัดที่มีอะลูมินาเป็นส่วนผสมหลัก (Alumina-based cutting tool) ซึ่ง แบ่งย่อยได้อีกคือ เครื่องมือตัดที่มีอะลูมินาความบริสุทธิ์สูงคือประกอบไปด้วยผงอะลูมินา 99

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมกับสารที่ช่วยในการเผาผนึกเช่น แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นตัวช่วยยับยั้งการเกิดเกรนโต นอกจากนี้ยังมีการเติมไททาเนียมออกไซด์ คาร์ไบด์ และโลหะ เพื่อช่วยสมบัติทางด้านความแข็งแรงและความเหนียว เนื่องจากเครื่องตัดอะลูมินามีความเหนียวต่ำและเครื่องมือตัด  $Al_2O_3-Ti(N, C)$  อะลูมินาชนิดนี้เป็นการเติมไททาเนียมคาร์ไบด์ในอะลูมินาเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล เช่น เพิ่มความแข็งแรงและค่าการนำความร้อนโดยเผาผนึกในบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิประมาณ 1750 องศาเซลเซียส สำหรับสมบัติของเครื่องมือตัดประเภทนี้เมื่อเปรียบเทียบกับพวกอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ พบว่ามีความแข็งแรงมากกว่าให้สามารถใช้กับการขึ้นรูปหยาบ นอกเหนือจากการขึ้นรูปละเอียดอีกด้วย<sup>(13)</sup>

(2) เครื่องมือตัดที่มีซิลิคอนไนไตรด์เป็นส่วนผสมหลัก เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดที่นิยมนำมาใช้ในงานตกแต่งขึ้นรูป ซิลิคอนไนไตรด์เป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำมาพัฒนาใช้ในงานเครื่องมือตัดค่อนข้างสูงเนื่องจากมีความเหนียวสูงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน แต่ข้อจำกัดในการใช้งานของวัสดุก็คือมักจะทำปฏิกิริยากับชิ้นงานเหล็กกล้าแต่เหมาะสำหรับตัดเหล็กหล่อเทาเพราะมีความเร็วรอบในการตัดสูง

## 2.2 วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่ถูกสร้างขึ้นจากส่วนประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือเรียกว่าเฟสหลัก (Matrix phase) และเฟสกระจายตัว (Distributed phase) หรือเรียกว่าเฟสเสริมแรง (Reinforced phase) ส่วนประกอบที่มาารวมกันจะมีความแตกต่างกันเช่นในด้านองค์ประกอบทางเคมี และที่สำคัญต้องไม่ละลายเข้าด้วยกัน<sup>(14)</sup> สมบัติของวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับสมบัติของสารตั้งต้นซึ่งสมบัติเดิมของส่วนประกอบแต่ละส่วนจะมีสมบัติอย่างไรอย่างหนึ่งดีเด่นมากกว่ากัน ดังนั้นเมื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบจะได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีทั้งหมดของส่วนประกอบตั้งต้นรวมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบนั้น วัสดุพื้นหรือเฟสต่อเนื่องเป็นวัสดุที่มีหน้าที่ห่อหุ้มหรือยึดจับวัสดุเสริมแรงให้ฝังตัวอยู่ได้ วัสดุเนื้อพื้นที่ดีควรมีความเสถียรทางเคมีที่ ต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุเสริมแรงในระหว่างการขึ้นรูปหรือระหว่างการเผาผนึก เพราะถ้าเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นจะทำให้สมบัติของวัสดุเนื้อพื้นและวัสดุเสริมแรงเปลี่ยนไป และต้องไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือรูปร่างของวัสดุเสริมแรง เช่น วัสดุเนื้อหลักต้องไม่ทำให้วัสดุเสริมแรงเกิดการแตกหรือหักได้ง่าย สามารถที่จะห่อหุ้มวัสดุเสริมแรงได้ ส่วนวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุที่กระจายอยู่ในวัสดุเชิงประกอบ มีสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุเนื้อพื้นและมีสมบัติที่ดีกว่า ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเนื้อพื้นมีสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งสมบัติที่ดีของวัสดุเสริมแรงต้องเข้ากันได้ (Compatibility) กับวัสดุเนื้อพื้น เช่น ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเคมี

ความสามารถในการทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรง ต้องเป็นตัวช่วยเสริมแรงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อพื้น โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุเสริมแรงจะมีค่าความแข็ง และความแข็งแรง มากกว่าวัสดุเนื้อพื้น มีน้ำหนักเบา เมื่อนำมาใช้ในวัสดุเชิงประกอบจะได้สมบัติเชิงกลอยู่ในรูปแบบสมบัติเฉพาะ มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีความเหนียว และมีความแข็งแรงสูง<sup>(15)</sup> วัสดุเสริมแรงสามารถแบ่งย่อยได้อีกตามรูปร่างโดยทั่วไปแล้วรูปร่างและขนาด ของวัสดุเสริมแรงจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลด้วย ซึ่งรูปแบบของวัสดุเสริมแรงจะแบ่งเป็น อนุภาค เส้นใยแบบสั้น (Whiskers or short fibers) เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง (Continuous fibers) และแบบแผ่น (Sheet laminate)<sup>(16)</sup>

### 2.3 วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

ในการเลือกวัสดุสำหรับงานเครื่องมือตัดนั้นถือว่าสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากว่าวัสดุมีมากมายหลายชนิดที่สามารถเตรียมเป็นเครื่องมือตัดได้แต่สมบัติเชิงกลก็แตกต่างกันไป วัสดุที่นิยมนำมาทำเครื่องมือตัดคือกลุ่มเซรามิกซึ่งวัสดุหลักๆคืออะลูมินา แม้ว่าอะลูมินามีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง แต่มีข้อด้อยคือเปราะดังที่กล่าวไว้แล้ว วัสดุที่น่าสนใจอีกตัวก็คือทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เนื่องจากมีความเหนียวสูงจากการศึกษาเบื้องต้นก็พบว่าวัสดุผสมที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุพื้นและมีทังสเตนคาร์ไบด์/โคบอลต์เป็นอนุภาคเสริมแรง จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ซึ่งอะลูมินาที่ใส่เข้าไปจะช่วยในเรื่องการต้านทานความร้อนสูงและการสึกกร่อน ทังสเตนคาร์ไบด์/โคบอลต์จะช่วยในด้านความเหนียวความยืดหยุ่น ดังนั้นสำหรับวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ น่าจะเหมาะสมและสามารถนำไปใช้ในทางด้านวัสดุตัดได้

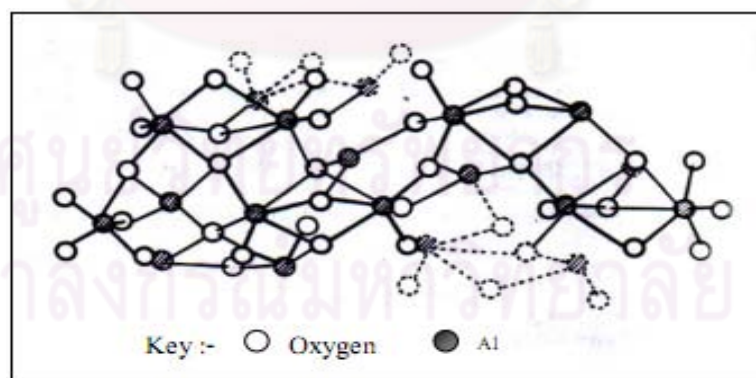
#### 2.3.1 อะลูมินา ( $Al_2O_3$ )

อะลูมินามีชื่อเรียกทางธรณีวิทยาว่า คอร์ันดัม ซึ่งเป็นแร่ที่ไม่บริสุทธิ์ รู้จักกันดีในรูปของวัสดุที่ใช้ในการขัดถู โดยคอร์ันดัมจะรวมถึงแร่ Andalusite, Silimanate และ Kyanite ซึ่งแร่ Andalusite เป็นแร่กลุ่มอะลูมินอซิลิเกต มีความเสถียรที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ ๆ ตรงกันข้ามกับแร่ Silimanate ซึ่งเสถียรที่อุณหภูมิสูง ๆ<sup>(16, 17)</sup> อะลูมินาสามารถสังเคราะห์ได้จากแร่ Bauxite และดินลูกรังโดยวิธีของ Bayer Process คือนำแร่มาบดแล้วหลอมด้วยโซดาไฟ (Caustic Soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผา<sup>(18)</sup> สำหรับโครงสร้างผลึกของอะลูมินานั้นจะมี 2 รูปแบบคือ อะลูมินาที่อยู่ในรูปผลึกเดี่ยวซึ่งนิยมนำไปใช้เป็นเครื่องประดับ และอะลูมินาที่อยู่ในรูปโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนนั้นจะมีราคาที่สูงกว่า เป็นวัสดุดิบที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างของอะลูมินาแสดงในรูปที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของอะลูมินาที่ใช้ในอุตสาหกรรมแสดงในตารางที่ 2.1

อะลูมินามีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน เช่น มีความแข็ง และมีเสถียรภาพทางเคมีที่สูง และเป็นสารที่มีความเฉื่อยมาก อีกทั้งทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่างต่างๆ ได้ดี ดังนั้นอะลูมินาจึงถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างหลากหลายเช่น ผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่ใช้ทำลูกบิด และเครื่องมือตัดแต่งวัสดุ สำหรับงานด้านเครื่องมือตัดนั้นอะลูมินายังมีข้อจำกัดสำหรับการใช้งานคือ อะลูมินามีความเปราะ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาโดยการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ<sup>(19)</sup>

### ตารางที่ 2.1 สมบัติของอะลูมินา

Properties	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	reference
Density, g/cm <sup>3</sup>	3.98	(20,25)
Melting temperature, °C	2054	(21)
Vickers hardness, GPa	20	(21,22)
Coefficient of thermal expansion (25-1000°C), 10 <sup>-6</sup> /K	8.5	(8,22)
Elastic modulus, GPa	300-400	(23)
Fracture toughness, MPa.m <sup>1/2</sup>	2.5-3.5	(24)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะลูมินา<sup>(25)</sup>

### 2.3.2 ทังสเดนคาร์ไบด์ (WC)

เป็นสารอนินทรีย์ที่มีปริมาณอะตอมของทังสเทนและคาร์บอนเท่าๆกัน ลักษณะผงสีดำเทา มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และมีความแข็งอยู่ที่ 8.5-9 Mohs scale มีความเหนียวและแข็งแรงสูง ด้วยเหตุนี้จึงถูกนำไปใช้ในงาน ชัดและตัดแต่ง มักจะใช้โคบอลต์เป็นตัวเชื่อมเพื่อเพิ่มสมบัติทางความเหนียว นอกจากนี้ยังนิยมใช้โลหะ เช่น นิกเกิล (Ni) และ เหล็ก (Fe) เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องมือตัด สมบัติทั่วไปของทังสเดนคาร์ไบด์แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของทังสเดนคาร์ไบด์

Properties	WC	reference
Density, g/cm <sup>3</sup>	15.8	(26)
Melting temperature, °C	2870	(26)
Indentation hardness, GPa	17-22.5	(24)
Coefficient of thermal expansion , 10 <sup>-6</sup> / K	5.76	(26)
Elastic modulus, GPa	520-700	(24)
Fracture toughness, MPa.m <sup>1/2</sup>	6	(26)

### 2.3.3 โคบอลต์ (Co)

โคบอลต์มีความหนาแน่น 8.6 g/cm<sup>3</sup> จุดหลอมเหลว 1490 องศาเซลเซียส มีความเหนียวสูง สีของโลหะโคบอลต์เป็นสีขาวออกชมพูเรื่อ ๆ จนเกือบจะเป็นสีเทา โคบอลต์ใช้เป็นวัสดุโลหะผสมกับเหล็กใช้ทำโลหะแม่เหล็ก และเป็นส่วนประกอบสำคัญของโลหะแข็ง ในยุคแรกๆใช้สินแร่โคบอลต์ในการผสมทำเครื่องเคลือบดินเผา และในอุตสาหกรรมแก้ว ประโยชน์ของโคบอลต์ที่สำคัญที่สุดในทางโลหะวิทยา ก็คือใช้ในโลหะผสมสำหรับทำเครื่องตัดโลหะด้วยความเร็วสูง ที่รู้จักกันทั่วไปและใช้มากที่สุด คือ สแตนเลส ซึ่งเป็นโลหะผสมของโคบอลต์ 45 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โครเมียม 30 – 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทังสเทน 12 –17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สแตนเลสนี้สามารถตัดโลหะแข็งแกร่งได้ด้วยความเร็วสูง และยังคงรักษาความคมไว้ได้ แม้จะได้รับความร้อน ในพวกโลหะผสมคาร์ไบด์ต่าง ๆ มีโคบอลต์ผสมอยู่กว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมและช่วยให้โลหะคาร์ไบด์ให้มีความแข็งแกร่งขึ้น<sup>(27)</sup> ใช้มากที่สุดในทังสเดนคาร์ไบด์ ซึ่งใช้ทำเครื่องมือตัดโลหะด้วยความเร็วสูง ส่วนต่างๆของเครื่องยนต์กังหันแก๊ส ปัจจุบันนี้ใช้โลหะโคบอลต์ 62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 5.5

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกับคาร์บอนอีกเล็กน้อย โลหะชนิดนี้ทนต่อความร้อนได้ดีมาก ประโยชน์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของโคบอลต์ คือใช้ในการทำโลหะผสมที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวรหลายชนิด โดยเฉพาะโลหะผสม อัลนิโค (AlNiCo) ซึ่งประกอบด้วยอะลูมิเนียม นิกเกิลและโคบอลต์ ชนิดของแร่โคบอลต์ที่สำคัญได้แก่แร่สมอลไลท์ ( $\text{CoAs}_2$ ) และแร่โคบอลต์ไทท์ ( $\text{CoAsS}$ )

### 2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบ

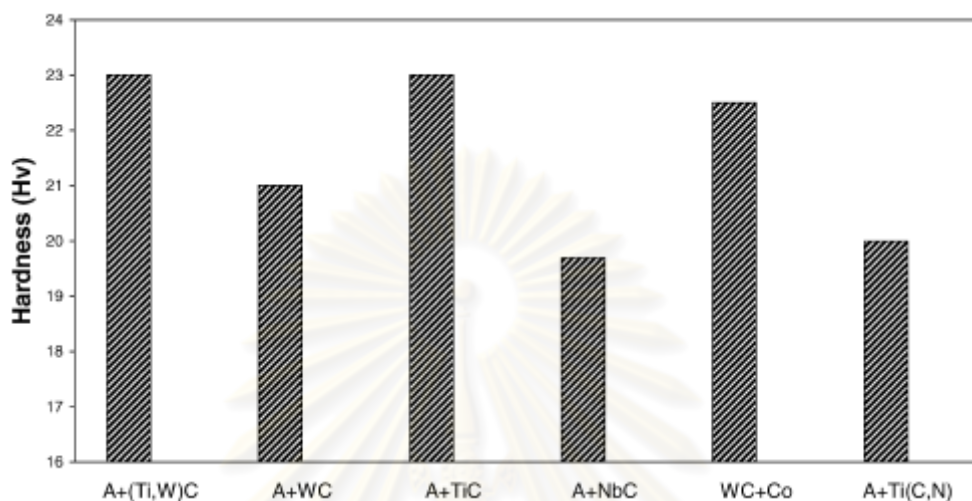
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้คือ ส่วนที่ 1 กล่าวถึง อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หรือ อะลูมินา/คาร์ไบด์อื่นๆ ส่วนที่ 2 เกี่ยวข้องกับ ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ และ ส่วนที่ 3 เป็นงานวิจัยวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

#### 1) อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หรือ อะลูมินา/คาร์ไบด์อื่นๆ

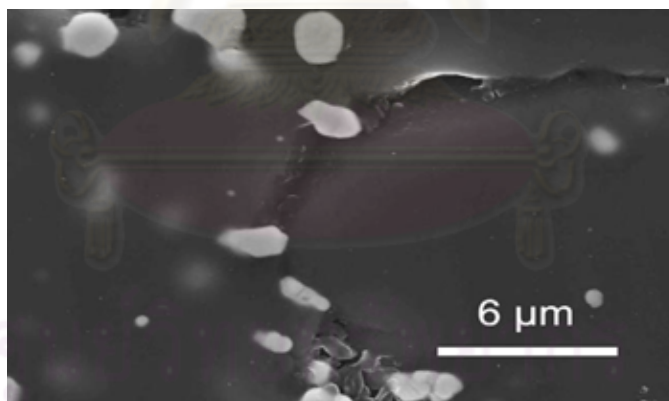
ในปี ค.ศ. 2000 Acchar และคณะ<sup>(2)</sup> ได้เตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยมีอะลูมินาเป็นเนื้อพื้นและมีทังสเตนคาร์ไบด์ เป็นวัสดุเสริมแรงโดยใส่ทังสเตนคาร์ไบด์ 5 10 20 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราขึ้นรูปและเผาผนึกที่ 1650 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศอาร์กอนโดยปราศจากแรงดัน จากการศึกษาพบว่า การเผาผนึกโดยวิธีนี้ทำให้ได้ความหนาแน่นที่ต่ำและพบว่าที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยน้ำหนักให้ค่าความแข็งและความเหนียวดีที่สุด และหลังจากใส่อนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์เข้าไปมากขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคลดลงจาก 3 เหลือ 2.3 ไมโครเมตรเนื่องจากเกิด pinning effect อย่างไรก็ตามแม้วิธีที่เผาผนึกแบบปราศจากแรงดันจะทำให้ได้ความหนาแน่นที่ต่ำกว่าการเผาผนึกแบบใช้แรงดันแต่ต้นทุนในการผลิตก็ถูกกว่าและกระบวนการไม่ซับซ้อน ต่อมาปี ค.ศ. 2004<sup>(5)</sup> ได้เตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมินาและมีไทเทเนียม/ทังสเตน คาร์ไบด์เป็นอนุภาคเสริมแรงโดยเติมอนุภาคเสริมแรง 5 10 20 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราขึ้นรูปด้วยความร้อนและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส พบว่าหลังจากเติมอนุภาคเสริมแรงเข้าไปในเนื้อพื้นอะลูมินาทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นและให้ค่าใกล้เคียงกับ อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และทังสเตนทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ จากงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาก่อนหน้านี้ ดังรูปที่ 2.4 และในปี ค.ศ. 2005<sup>(24)</sup> ได้เตรียมวัสดุผสมที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุพื้นและมีทังสเตนคาร์ไบด์ทำหน้าที่เป็นอนุภาคเสริมแรงโดยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (hot pressing) และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของการใส่ทังสเตนคาร์ไบด์ของวัสดุผสมที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุพื้นซึ่งพบว่าหลังจากเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น อาทิ ความแข็ง ความเหนียว และอธิบายถึงกลไกการเกิดความเหนียวว่า เกิดจากอนุภาคเสริมแรงทังสเตนคาร์ไบด์ทำหน้าที่



ยับยั้งรอยแตกจึงเกิดกลไกของความเหนียวจากการหักเหของรอยแตก (Crack deflection) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบจากงานวิจัยที่ผ่านมา<sup>(5)</sup>



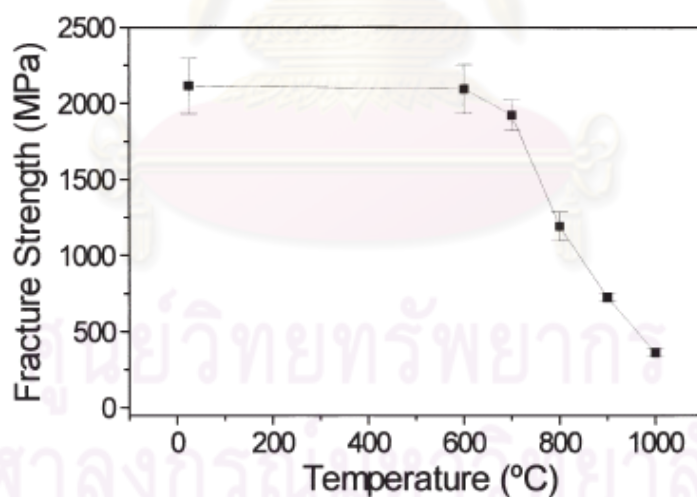
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดความเหนียวโดยการหักเหของรอยแตก (Crack deflection)<sup>(24)</sup>

ในปี คศ. 2001 Wang<sup>(3)</sup> ได้ศึกษาผลกระทบของอนุภาคคาร์ไบด์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นอะลูมินา โดยใส่ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 6 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร อัดขึ้นรูปด้วยความร้อน และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 และ 1550 องศาเซลเซียสในบรรยากาศไนโตรเจน จากการศึกษาพบว่าหลังจากเติมทั้งสแตนคาร์ไบด์เข้าไปในเนื้อพื้นอะลูมินาทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจาก 520 เป็น 581 MPa ความเหนียวเพิ่มขึ้นจาก 3.5 เป็น 5.13 MPam<sup>1/2</sup> ซึ่ง

อธิบายไว้ว่า ความเหนียวและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจาก เมื่อมีแรงมากจะทำให้วัสดุมีรอยแตก รอยแตกจะเริ่มขยายและเมื่อเจออนุภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์รอยแตกไม่สามารถแตกต่อได้ นอกจากต้องอ้อมอนุภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์ทำให้ที่ปลายรอยแตกอ่อนตัวลงจึงนำไปสู่กลไกการเกิดความเหนียว และนอกจากนี้หลังเติมทั้งสแตนคาร์ไบด์เข้าไปทำให้ขนาดอนุภาคของอะลูมินาลดลงจาก 2.79 เหลือ 1.45 ไมโครเมตร เนื่องจากอนุภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์ทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดเกรนโตของอะลูมินานั่นเอง

## 2) ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

Acchar และคณะ<sup>(6)</sup> ได้ศึกษาโดยเตรียมทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ในอัตราส่วน 90:10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยการอัดขึ้นรูปทิศทางเดียวศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิต่อความแข็งแรงของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์พบว่า การเตรียมทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่ใช้ในงานเครื่องมือตัดถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสจะทำให้ความแข็งแรงของคมตัดลดลง (รูปที่ 2.6) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของสารประกอบทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์กับออกซิเจน มี อัตราการรวมตัวกันสูงทำให้เกิดความบกพร่องในโครงสร้าง ดังนั้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้นั้นจะต้องศึกษาเพิ่มเติมอีก

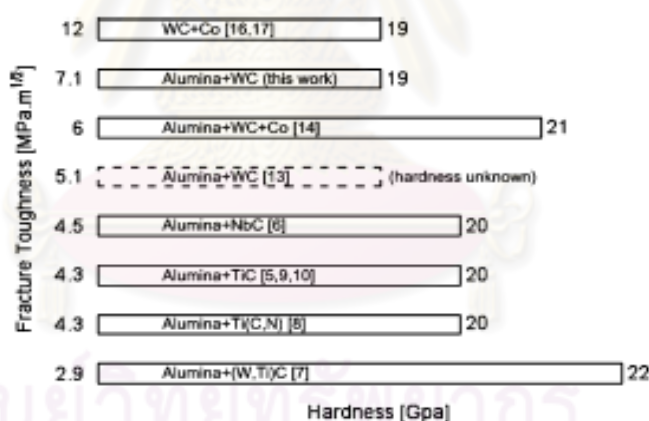


รูป 2.6 ความแข็งแรงของวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ<sup>(6)</sup>

Jia และคณะ<sup>(28)</sup> ได้ศึกษาการเตรียมทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ อนุภาคนาโนเมตร ในอัตราส่วน 89:11 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Hot pressing) พบว่าการเตรียมทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ให้ได้อนุภาคนาโนเมตรจะช่วยส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นและต้องใช้อุณหภูมิในการเผาขึ้นสูงกว่า 1300 องศาเซลเซียสในการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง (Dry

pressing) โดยปราศจากแรงดันจึงจะได้ความหนาแน่นที่สูงกว่า 87 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบความหนาแน่นทางทฤษฎี

สมบัติและธรรมชาติโดยทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หรือ อะลูมินา/คาร์ไบด์อื่นๆ เปรียบเทียบกับ ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ คือ อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หรือ อะลูมินา/คาร์ไบด์อื่นๆ จะมีความแข็งสูงในช่วง 18-23 GPa มีความเหนียวแต่น้อยกว่า ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง สำหรับ ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์มีความแข็งประมาณ 17-22.50 GPa มีความแข็งแรง มีความเหนียวสูงระหว่าง 11-12 MPa m<sup>1/2</sup> (5) เหนียวกว่าอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ มักจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรที่อุณหภูมิสูงและต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำ ดังนั้นหากนำอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ และทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ มาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบขึ้นมาใหม่สำหรับงานตัดแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลน่าจะทำได้วัสดุตัดที่มีศักยภาพมากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่เตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ทำให้มีความเหนียวและมีความแข็งสูงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความแข็งและความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ<sup>(24)</sup>

### 3) อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

Tai และคณะ<sup>(29)</sup> ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบโดยเตรียม อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ โดยใช้โคบอลต์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทังสเตนคาร์ไบด์ 2.5-85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัดขึ้นรูปด้วยความร้อนและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1360 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่มีการขึ้นรูปด้วยวิธีเดียวกัน จากการศึกษพบว่าอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ให้ความแข็ง และ ความแข็งแรง

มากกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์และที่ 10:80:10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ให้ความแข็งแรงสูงถึง 1250 MPa และสูงถึง 9 MPam<sup>1/2</sup>

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ได้ข้อสรุปว่าในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบสำหรับเครื่องมือตัดที่มีสารตั้งต้นเป็น อะลูมินา ทั้งสแตนคาร์ไบด์ และ โคบอลต์ จะทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือตัดได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเครื่องมือตัดโดยเตรียมจากวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุพื้น โดยมีทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์เป็นอนุภาคเสริมแรงองค์ประกอบทางเคมีจะควบคุมให้มีอะลูมินา 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผสมและอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น อัตราส่วนระหว่างอะลูมินากับอนุภาคเสริมแรง ปริมาณโคบอลต์และอุณหภูมิในการเผา ต่อสมบัติของชิ้นงาน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/สแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เริ่มตั้งแต่วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ การเตรียมตัวอย่าง การขึ้นรูปชิ้นงาน การเผาผนึก รวมถึงการตรวจสอบลักษณะสมบัติ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบสมบัติเชิงกลตามลำดับ

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้จำแนกออกเป็น 2 กลุ่มคือ (1) วัตถุดิบที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง และ (2) วัตถุดิบสำหรับใช้เป็นเนื้อพื้น วัตถุดิบที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง มีดังนี้คือผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC, ATI Engineered Products, USA) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.2 ไมโครเมตร ผงโคบอลต์ (Co, 99.8% purity, Marshall Hard Metals Ltd, Sheffield, United Kingdom) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ทางการค้า (WC-Co, Marshall Hard Metals Ltd, Sheffield, United Kingdom) และวัตถุดิบสำหรับใช้เป็นเนื้อพื้นคือผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ , AKP-30, 99.99% purity, 0.3  $\mu m$ , Sumitomo, Japan) มีขนาดอนุภาค 0.3 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 5-10 ตารางเมตรต่อกรัม พอลิไวนิลพิวทริรอล (PVB, Wako Pure Chemical Industries, Japan) ใช้สำหรับเป็นตัวประสานช่วยในการขึ้นรูป มีน้ำหนักโมเลกุล 630 เอทานอล ( $C_2H_6O$ ) มีความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรใช้เป็นตัวทำละลายในขั้นตอนการบดส่วนผสมวัตถุดิบ

### 3.1.2 การวิเคราะห์ผงวัตถุดิบ

#### 3.1.2.1 การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution, $D_{50}$ )

วัดการกระจายขนาดอนุภาคโดยใช้โดยหลักการ Laser Scattering (Particle Size Analyzer, Mastersizer 2000, Malvern) โดยการนำผงตัวอย่างมากระจายในน้ำกลั่น

#### 3.1.2.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)

วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของวัตถุดิบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM - 6480LV, JEOL) ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยนำผงอะลูมินา ผงทังสเตนคาร์ไบด์ ผงโคบอลต์ ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาโรยลงบนเทปกาวคาร์บอนที่ติดอยู่บนแผ่นแท่นรอง โดยการโรยบางๆ แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปวิเคราะห์เพื่อดูสัณฐานวิทยา

#### 3.1.2.3 องค์ประกอบทางเฟส (Phase content)

ชิ้นงานที่เตรียมได้จากการทดลองจะนำมา มาศึกษาองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (D8-Advance, Bruker) โดยใช้  $\text{Cu} - K_{\alpha}$  radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม  $2\theta$  ตั้งแต่ 20 ถึง 80 องศาซึ่งเตรียมสารตัวอย่างโดยบดสารให้ละเอียด แล้วตักสารใส่กรอบสำหรับใส่ตัวอย่างให้เต็มพร้อมทั้งใช้กระจกใสกดทับค่อยๆ ให้สารกระจายเต็มกรอบอย่างทั่วถึงแล้วนำไปวิเคราะห์

### 3.2 ขั้นตอนในการทดลอง

#### 3.2.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองโดย เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สูตรส่วนผสมที่ 1-5 เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เหมาะสมและศึกษาเปรียบเทียบทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่เตรียมจากการผสมเองกับผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผสมรวมกับโคบอลต์มาแล้วในทางการค้า จากนั้นนำผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมไปทดสอบสูตรส่วนผสมที่ 6-9 โดยที่สูตรส่วนผสมที่ 6-9 จะเป็นการทดลองเพื่อดูผลของปริมาณโคบอลต์ต่อสมบัติของชิ้นงาน

#### 3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมส่วนผสมโดยใช้ผงอะลูมินา 0.3 ไมโครเมตร ความบริสุทธิ์มากกว่า 99.9 เปอร์เซ็นต์ ผงทังสเตนคาร์ไบด์อนุภาคขนาด 1.2 ไมโครเมตร ผงโคบอลต์อนุภาคขนาดน้อยกว่า 2 ไมโครเมตร เตรียมส่วนผสมตามตารางที่ 3.1 แล้วนำส่วนผสมทั้งหมดไปบดผสมเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในขวด

พอลิเอทิลีนโดยใช้ลูกบดอะลูมินามีเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวกลาง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เมช สำหรับการผงในการอัดขึ้นรูปเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรงทำโดยละลายพอลิไวนิลพิวทิวโรลในเอทานอลความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และนำสารละลายที่ได้มาผสมกับผงวัตถุดิบที่เตรียมไว้ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม แล้วร่อนผ่านตะแกรงก่อนทำการขึ้นรูป

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบอะลูมินา ทั้งสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ที่ใช้ในการทดลอง

สูตรส่วนผสมทางเคมี	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	WC (wt%)	Co (wt%)
สูตรที่ 1	90	10	-
สูตรที่ 2	90	9.4	0.6
สูตรที่ 3	90	9.0	1.0
สูตรที่ 4	90	7.0	3.0
สูตรที่ 5	-	94	6.0
สูตรที่ 6	80	20	-
สูตรที่ 7	80	18	2
สูตรที่ 8	80	16	4
สูตรที่ 9	80	14	6

สำหรับสูตรผสมทางเคมีจะศึกษาโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 จะศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาผลาญใน สูตรที่ 1-5 ส่วนที่ 2 ศึกษาโดยเปรียบเทียบทั้งสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่เตรียมจากการผสมเองกับผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ผสมรวมกับโคบอลต์มาแล้วในทางการค้า สูตรที่ 2 และในส่วนที่ 3 จะนำอุณหภูมิที่เหมาะสมมาปรับปรุงสูตรส่วนผสมโดยศึกษาผลของโคบอลต์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ สูตรที่ 1-9

### 3.2.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน

นำผงวัตถุดิบที่ผ่านการบดผสมแล้วมาอัดแห้งขึ้นรูปเป็นเม็ดกลม (pellet) น้ำหนักประมาณ 1 กรัมและได้น้ำหนักสุดท้ายประมาณ 0.9 กรัมโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร สำหรับการอัดเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงจะใช้น้ำหนักสำหรับขึ้นรูป 3.5 กรัมโดยใช้แม่พิมพ์สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร×36 มิลลิเมตร โดยทำการอัด

ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Uniaxial pressing, NT-100H) ใช้ความดัน 30 เมกะพาสคัลและนำชิ้นงานไปอบอีกครั้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปเผาผนึก

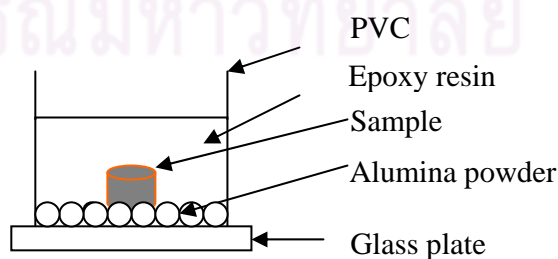
### 3.2.4 การเผาผนึก

เตรียมตัวอย่างได้โดย นำตัวอย่างที่อัดขึ้นรูปเสร็จไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสแล้วนำมาใส่ในแม่แบบซึ่งการทดลองนี้ใช้แม่แบบกราฟไฟต์ที่เคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์ซึ่งต้องเคลือบเพื่อป้องกันการหลอมของชิ้นงาน นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมาเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ในเตาเผาควบคุมบรรยากาศ (Hi-Multi 5000, FV PHP-R-5, FRET-25) แล้วนำไปเข้าเตาเผากราฟไฟต์

### 3.2.5 การเตรียมชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติและโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งและความเหนียวสามารถเตรียมได้ดังนี้

1) เตรียมเรือนจับและขัดชิ้นงาน เพื่อความสะดวกในการจับชิ้นงานเพื่อที่จะนำไปขัดและทดสอบ เตรียมโดยนำแผ่นรองที่เป็นกระจกมาวางไว้แล้วนำท่อพีวีซีมาวางบนกระจกและใช้ดินน้ำมันล้อมรอบท่อพีวีซี เพื่อป้องกันเรซินไหลออกมาข้างนอกจากนั้นนำวาสลีนมาทาที่กระจกและท่อพีวีซีให้ทั่ว จากนั้นใส่ชิ้นงานลงไปพร้อมทั้งค่อยๆเทเรซินที่ผสมกับสารช่วยให้แข็งพร้อมกับผงอะลูมินาเล็กน้อย รอให้เรซินแข็งแล้วจึงนำชิ้นงานออกจากท่อพีวีซี ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งการใส่ผงของอะลูมินาเข้าไปด้วยเพื่อเวลาทำการขัดจะได้ชิ้นงานที่ได้ระนาบสูง เรซินเป็นวัสดุที่อ่อนเวลาขัดจะสูญเสียเนื้อวัสดุไปก่อนชิ้นงานการมีผงอะลูมินาอยู่ที่ผิวหน้าของเรซินก็จะช่วยลดปัญหาในเรื่องการขัดชิ้นงานที่ไม่ได้ระนาบได้



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางภายในเรือนจับ

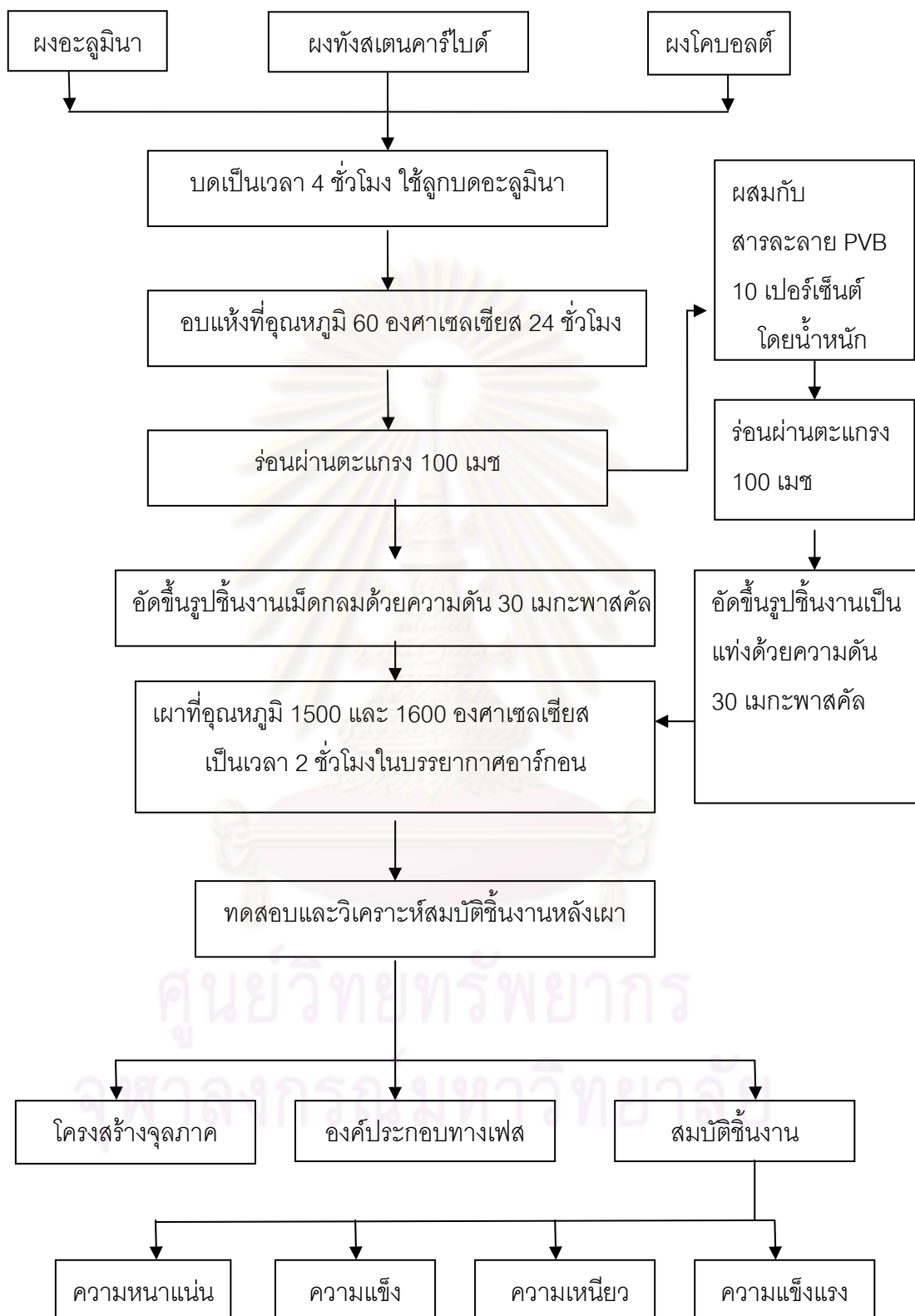


2) การขัดชิ้นงานนำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 120 240 600 1200 และ 2500 ตามลำดับ แล้วจึงชิ้นงานไปขัดละเอียด ด้วยผงเพชรโดยแต้มผงเพชรบนผ้าสักหลาดโดยใช้ผงเพชรขนาด 3 ไมโครเมตรและ 1 ไมโครเมตร และก่อนจะเปลี่ยนขนาดผงเพชรต้องนำชิ้นงานไปใส่ในเครื่องสั่นสะเทือนความถี่สูงเพื่อชะล้างอนุภาคที่เกาะบนผิวหน้า ชิ้นงานมีความเรียบและผิวมันเงา ไปทดสอบความแข็งและความเหนียวต่อไป

3) นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกและขัดมากัดผิวด้วยความร้อน (thermal etching) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที ในบรรยากาศอาร์กอน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 : แผนผังการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

### 3.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

#### 3.3.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของชิ้นงานวัดได้โดยใช้วิธีการแทนที่ในน้ำ (Archimedes method) โดยคำนวณหาความหนาแน่นโดยรวมตามมาตรฐาน ASTM : C 830-93<sup>(30)</sup> โดยนำชิ้นงานใส่ลงไปในหม้อสุญญากาศ ดูดอากาศออกประมาณ 30 นาที จากนั้นเทน้ำให้ท่วมชิ้นงานทิ้งไว้อีก 5 นาที แล้วนำชิ้นงานมาซึ่งจะได้น้ำหนักในน้ำ และใช้ผ้าหมาดๆซับน้ำ ที่ผิวงานชิ้นออกแล้วนำไปชั่ง น้ำหนักจะได้ค่าน้ำหนักที่อิ่มตัวด้วยน้ำจากนั้นนำชิ้นงานไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักได้เป็นน้ำหนักแห้ง แล้วคำนวณค่าความหนาแน่นรวมดังสมการ (3.1)

$$\rho_{\text{bulk}} = \frac{W_{\text{dry}}}{W_{\text{sat}} - W_{\text{sus}}} \times \rho_{\text{water}} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\rho_{\text{bulk}}$  = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $W_{\text{dry}}$  = น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)  
 $W_{\text{sat}}$  = น้ำหนักของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)  
 $W_{\text{sus}}$  = น้ำหนักของชิ้นงานในน้ำ (กรัม)

ส่วนค่าความหนาแน่นเชิงทฤษฎี (Theoretical density) สามารถคำนวณจากกฎของผสม (Rule of mixtures) ดังสมการ (3.2)

$$\rho_{\text{th}} = \frac{W_{\text{total}}}{W_a/\rho_a + W_b/\rho_b + W_c/\rho_c} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $W_{\text{total}}$  = น้ำหนักรวมทั้งหมด  
 $W_a, W_b, W_c$  = น้ำหนักของสาร a, b และ c ตามลำดับ (กรัม)  
 $\rho_a, \rho_b, \rho_c$  = ความหนาแน่นของสาร a, b และ c ตามลำดับ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร  
a, b และ c = สารที่ใช้ (กรัม)

และเมื่อได้ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นทางทฤษฎีแล้วก็สามารถคำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้ดังสมการ (3.3)

$$\%TD = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\rho_{\text{th}}} \times 100 \quad (3.3)$$

### 3.3.2 ความแข็งและความเหนียว

วัดค่าความแข็งและความเหนียวของชิ้นงาน ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Vickers Hardness Tester (HV-50A, Laizhou Huayin) โดยเครื่องที่ใช้เป็นการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์หัวกดเพชรรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมซึ่งการทดลองนี้ใช้แรงกดเท่ากับ 10 กิโลกรัม ระยะเวลา 15 วินาที จากนั้น วัดเส้นทแยงมุมของรอยกด คำนวณค่าความแข็งตาม ASTM : C 1327-03<sup>(31)</sup> ดังสมการ (3.4) จากนั้นวัดเส้นแนวรอยแตกทั้ง 4 มุมเพื่อ คำนวณหาค่าความเหนียว<sup>(32)</sup> ดังสมการ (3.5)

$$H_v = 0.1854 \times (9.807P / \bar{d}^2) \quad (3.4)$$

$H_v$  = ค่าความแข็งที่ได้จาก Vickers Indenter (จิกะพาสคัล)  
 $P$  = น้ำหนักที่หัวกด (กิโลกรัม)  
 $\bar{d}$  = ค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุมของรอยกด (มิลลิเมตร)

$$K_c = 0.018 \left( \frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \left( \frac{P}{c} \right)^{3/2} \quad (3.5)$$

$K_c$  = ค่าความเหนียวที่ได้จาก Vickers Indenter (เมกะพาสคัล เมตรกำลังหนึ่งส่วนสอง)  
 $E$  = ค่าความยืดหยุ่น (จิกะพาสคัล) ได้จากค่าทางทฤษฎี  
 $H_v$  = ค่าความแข็ง (จิกะพาสคัล)  
 $P$  = น้ำหนักที่หัวกด (กิโลกรัม)  
 $c$  = ค่าค่าเฉลี่ยเส้นแนวรอยแตกของรอยกด (มิลลิเมตร)

โดยที่มอดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบคำนวณจาก ปริมาณของผงวัสดุที่ใช้และค่าคงที่ของวัสดุได้แก่  $Al_2O_3 = 401 \text{ GPa}^{(33)}$  และ  $3.97^{(31)} \text{ g/cm}^3$   $WC = 700 \text{ GPa}^{(2)}$  และ  $15.80^{(33)} \text{ g/cm}^3$   $Co = 207 \text{ GPa}^{(34)}$  และ  $8.89^{(34)} \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ

### 3.3.3 ความแข็งแรง (Flexural Strength)

ทดสอบค่าความแข็งแรง ด้วยเครื่อง Universal testing machine (5882 Instron) วัด ด้วยวิธีทดสอบแรงดัดโค้ง 3 จุด ตาม ASTM : Designation C 1161-02c<sup>(35)</sup> ใช้ความเร็วในการกด 0.2 มิลลิเมตรต่ออนาที ความกว้างของจุดรองรับตัวอย่าง (L) 20 มิลลิเมตรใช้ทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง โดยเตรียมชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแบบแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า 5 ตัวอย่างเป็นอย่างต่ำมาตัด ด้วยเครื่องตัดใบตัดเพชรให้ได้ขนาดประมาณ 4 มิลลิเมตร × 3 มิลลิเมตร × 25 มิลลิเมตร จากนั้น

นำชิ้นงานไปขัดให้ได้ระนาบด้วยจานขัดเพชรเบอร์ 170 แล้วนำไปเข้าเครื่องสั่นสะเทือนคลื่นความถี่สูงเพื่อชะล้างสิ่งเจือปนและอนุภาคที่เกาะผิวหน้าแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบโดยต้องทำการบันทึกค่าความหนา ( $t$ ) ความกว้างของชิ้นงาน ( $w$ ) และค่าแรงกระทำ ( $P_f$ ) ที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก แล้วคำนวณความต้านทานต่อการตัดโค้ง ดังสมการ (3.6)

$$\sigma_f = \frac{3P_f L}{2W_t^2} \quad (3.6)$$

เมื่อ

- $L$  = ความกว้างของจตุรกรงรับตัวอย่าง (มิลลิเมตร) กำหนดให้ 20 มิลลิเมตร  
 $P_f$  = แรงกระทำ (พาสคัล)  
 $t$  = ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)  
 $W$  = ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

### 3.3.4 โครงสร้างจุลภาค

วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-6480LV, JEOL) เช่นเดียวกับกับห้องการศึกษาสัณฐานวิทยาของผงอนุภาควัตตุดิบตามหัวข้อที่ 3.32 เตรียมตัวอย่าง แล้วนำชิ้นงานมาติดกับแท่นรองที่มีเทปคาร์บอนติดอยู่ แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปวิเคราะห์ศึกษาพื้นผิวภาคตัดขวางสัณฐานวิทยา ลักษณะของรอยแตกและรูพรุนของชิ้นงาน พร้อมทั้งหาขนาดเกรน สำหรับการหาขนาดเกรนสามารถหาได้ด้วยวิธี The linear intercept ตาม ASTM : Designation E112-96<sup>(36)</sup>

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงถึงผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองที่ได้โดยแบ่งได้ดังนี้คือ (1) การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตถุดิบ (2) ผลของการทดสอบอนุภาคหุ้มผิว (3) ผลของโคบอลต์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ตามลำดับ

#### 4.1. ลักษณะเฉพาะของผงวัตถุดิบ

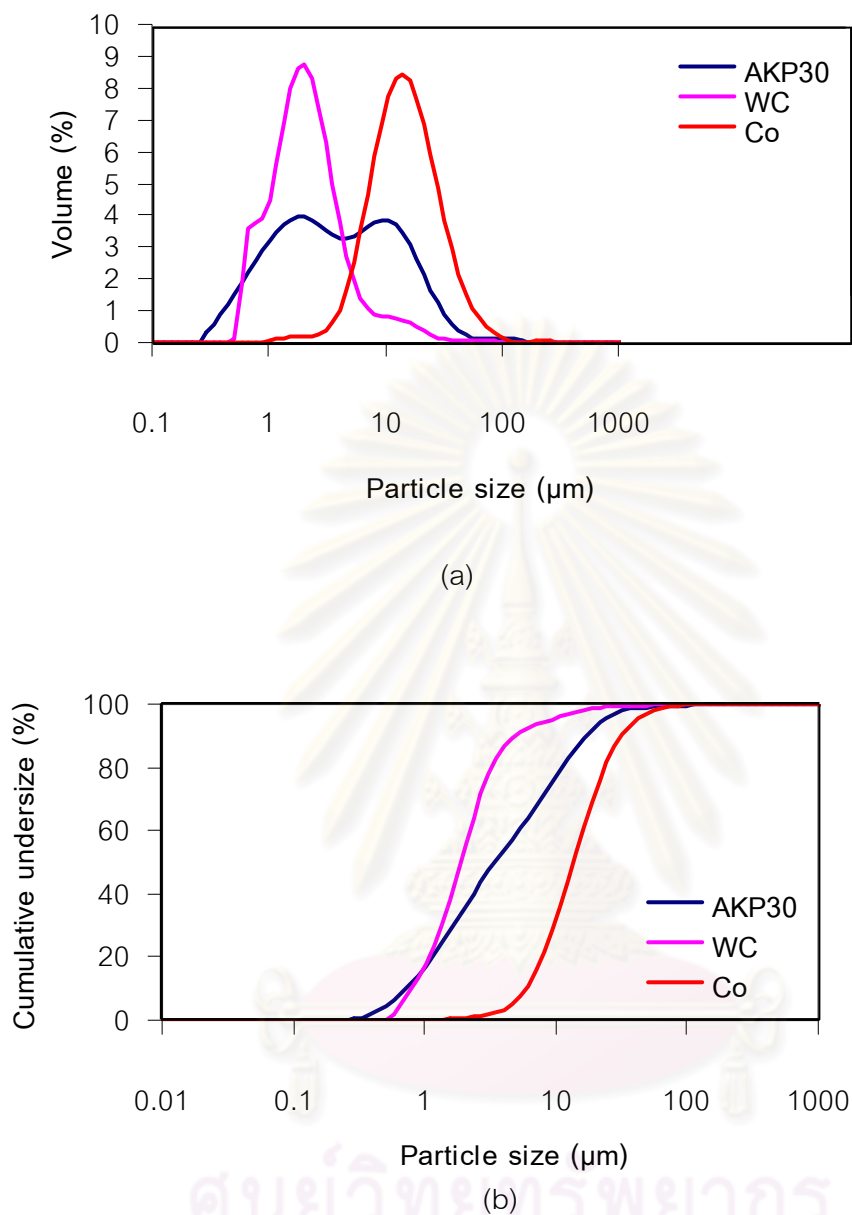
##### 4.1.1 การกระจายขนาดอนุภาค

รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ อะลูมินา ทังสเตนคาร์ไบด์ และโคบอลต์ ตามลำดับจากรูปพบว่า ผงอะลูมินามีการกระจายขนาดในช่วงกว้างคือมีการกระจายขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.3-182 ไมโครเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) มีค่าเท่ากับ 3.7 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคใหญ่กว่าค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตซึ่งได้ค่า 0.3 ไมโครเมตร<sup>(30)</sup> น่าจะเกิดจากการเตรียมผงวัตถุดิบก่อนการทดสอบขนาดอนุภาคในการทดลองเกาะกัน (agglomerates)

ผงทังสเตนคาร์ไบด์ มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงแคบคือมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.6-104.7 ไมโครเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 2.0 ไมโครเมตร ซึ่งได้ขนาดใกล้เคียงกับค่าที่มาจากทางบริษัท

ผงโคบอลต์มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงกว้างคือมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.7-350 ไมโครเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 12.6 ไมโครเมตร

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

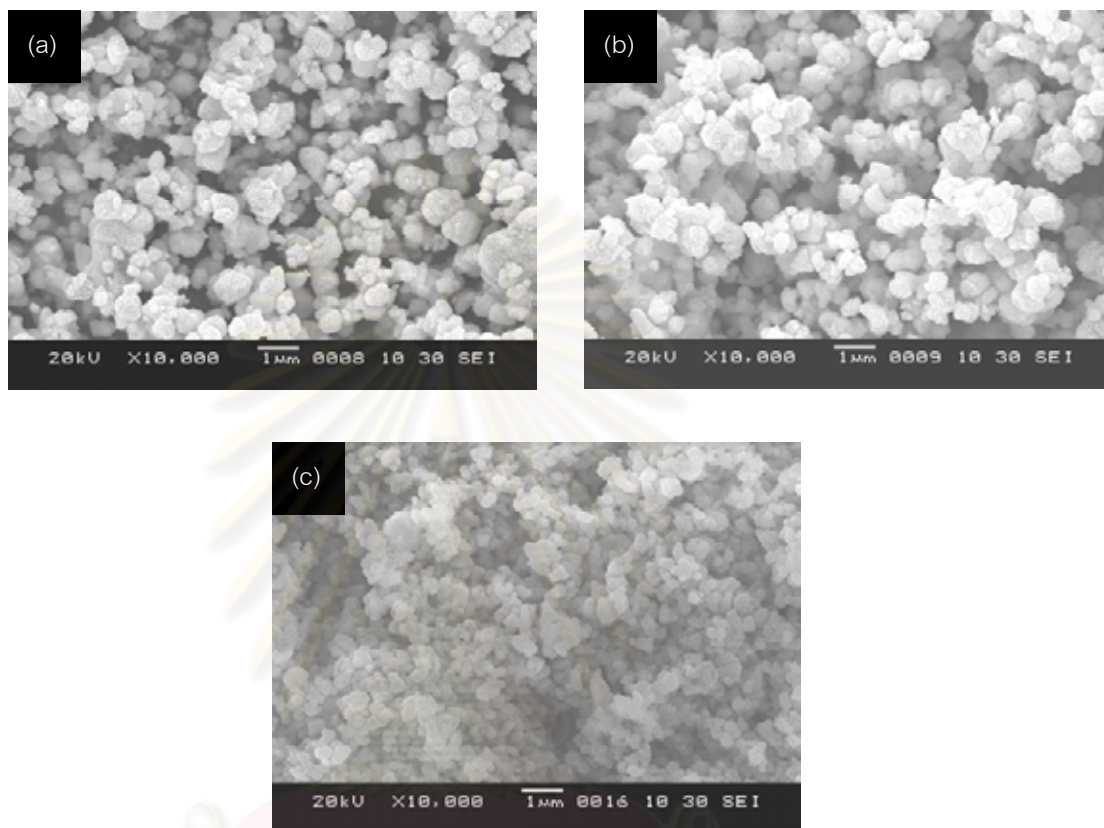


รูปที่ 4.1 (a) การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัสดุดิบ (b) การกระจายขนาดสะสมของอนุภาคของผงวัสดุดิบทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.1.2. สันฐานวิทยา

ในรูปที่ 4.2 แสดงสันฐานวิทยาของวัสดุดิบตั้งต้นวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รูปที่ 4.2 (a) คือผงอะลูมินา (b) ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (c) ผง 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co จากรูปพบว่าผงอะลูมินามีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร รูปร่างค่อนข้างกลมและเกาะตัวกัน ส่วนผงของทังสเตนคาร์ไบด์ก็มีรูปร่างค่อนข้างกลมและ

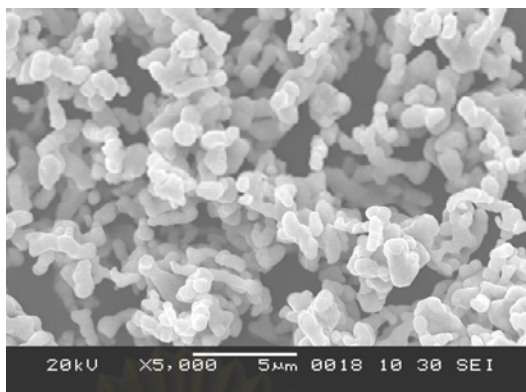
สัณฐานวิทยาของอะลูมินาและทังสเตนคาร์ไบด์มีรูปร่างแบบไม่แน่นอนและผงอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์มีขนาดอนุภาคเล็กเกาะกันรูปร่างค่อนข้างกลมและสัณฐานวิทยา



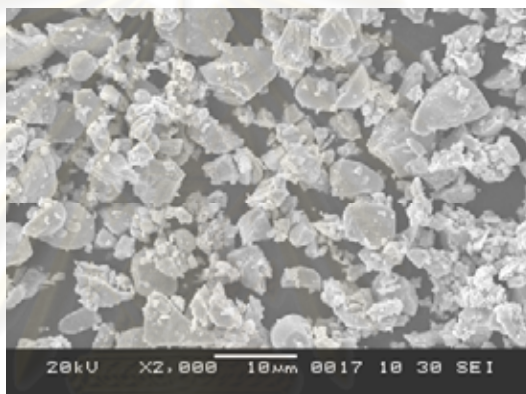
**รูปที่ 4.2** สัณฐานวิทยาของ a) ผงอะลูมินา b) ผงทังสเตนคาร์ไบด์ c) ผง 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 9.4wt% WC+0.6wt% Co e) ผง 94wt% WC+ 6wt% Co

รูปที่ 4.3 คือผงของโคบอลต์พบว่ามีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าอะลูมินาและเกาะตัวกันและรูปที่ 4.4 คือผงของทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์มีรูปร่างไม่แน่นอนและเกาะตัวกัน





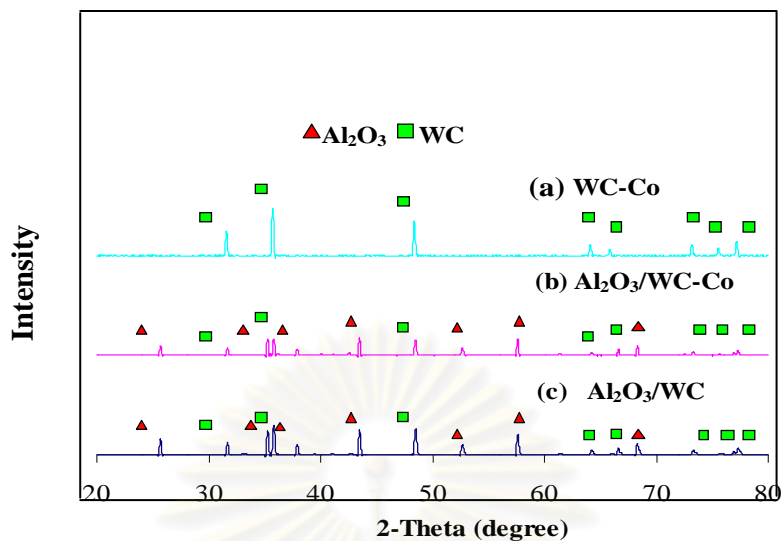
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของผงโคบอลต์



รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของผง 94wt% WC + 6wt% Co

#### 4.1.3 องค์ประกอบทางเฟส

องค์ประกอบทางเฟสของผงสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่อง XRD ได้ผลดังรูปที่ 4.5 (a) คือ 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 10wt% WC เผาผนังที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสตรวจพบได้แค่สองเฟส คือเฟสของอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , JCPDS หมายเลข 00-046-1212) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบรวมโบฮีดรอล และพบเฟสทังสเตนคาร์ไบด์ (WC, JCPDS หมายเลข 03-065-4539) มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และไม่มีเฟสอื่นปลอมปน (b) คือ 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co พบแค่เฟสของอะลูมินาและเฟสทังสเตนคาร์ไบด์ ไม่พบเฟสของโคบอลต์แสดงรายละเอียดของเฟสแต่ละชนิดในภาคผนวก ข (c) คือ 94wt% WC + 6wt% Co พบแค่เฟสของทังสเตนคาร์ไบด์ไม่พบเฟสโคบอลต์เช่นกันซึ่งการที่ไม่พบเฟสของโคบอลต์น่าจะเกิดจากปริมาณโคบอลต์ที่ใส่เข้าไปมีปริมาณน้อยเกินไป จึงทำให้ไม่สามารถตรวจพบเฟสของโคบอลต์ก็เป็นไปได้



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ที่องค์ประกอบเคมีต่างๆ a) 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 10wt% WC b) 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co c) 94wt% WC + 6wt% Co

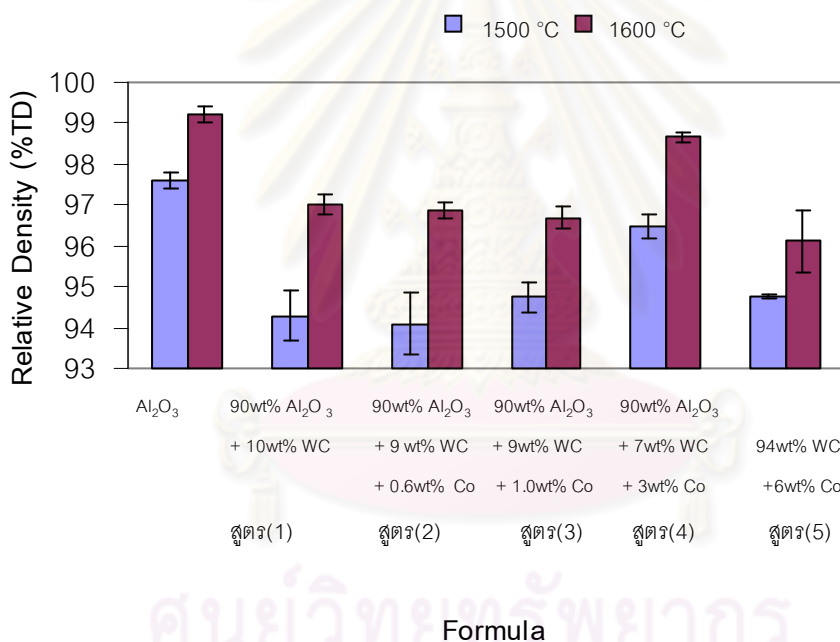
#### 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

ในงานวิจัยนี้จะทดสอบผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ โดยเผาผืนที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส ดูผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนาแน่น ความแข็ง และความเหนียว และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.2.1 ความหนาแน่น

ในการทดสอบผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบทดสอบโดยวิธีการแทนที่ในน้ำซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เนื่องจากหลังเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดอนุภาคของชิ้นงานชิดกันมากขึ้น ขนาดรูพรุนน้อยลง เลยส่งผลให้ความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสก็ให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ค่อนข้างสูงอยู่ที่ประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบความหนาแน่นทางทฤษฎีเนื่องจากขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นมีความละเอียดและจะเห็นได้ว่าการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสสูงถึง 98.7 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบความหนาแน่น

ทางทฤษฎี ที่องค์ประกอบทางเคมี 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 7wt% WC + 3wt% Co (สูตรที่ 4) ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปด้วยความร้อนของอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์<sup>(24)</sup> ดังนั้นจากผลการทดลองอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ก็คืออุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เพราะถ้าใช้อุณหภูมิเผาที่ต่ำกว่า 1600 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมินาจะทำให้ความหนาแน่นลดลงเพราะเกิด over firing<sup>(30)</sup> และเมื่อเติมทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ในเนื้อพื้นอะลูมินาจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากอนุภาคของวัสดุเสริมแรงที่ได้เข้าไปในเนื้อพื้นอะลูมินาทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดเกรนโตของเนื้อพื้นอะลูมินาจึงทำให้การแพร่ของมวลข้ามขอบเกรนลดลงดังนั้นเมื่อเติมทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ในเนื้อพื้นอะลูมินาจึงทำให้ความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย<sup>(2)</sup>

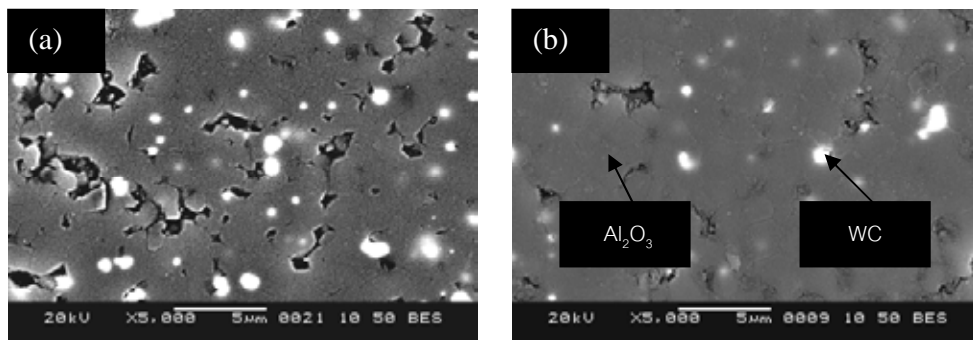


รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียสของวัสดุเชิงประกอบที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ

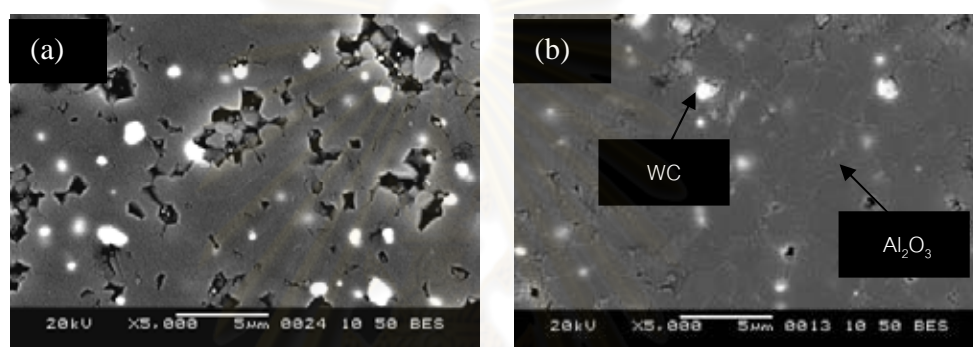
#### 4.2.2 โครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 4.7 และ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส จากรูปจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสชิ้นงานมีรูพรุนสูงกว่า 1600 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิที่ 1500 องศาเซลเซียส อาจยังไม่สูงพอสำหรับวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่จะทำให้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ทำให้

อนุภาคยังไม่เชื่อมต่อกันของเกรน<sup>(37)</sup> ซึ่งส่งผลต่อค่าความหนาแน่น ทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์และอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ต่ำกว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส และจากตารางที่ 4.1 วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ มีขนาดเกรนลดลงเมื่อเทียบกับอะลูมินาจากงานวิจัยที่ผ่านมา<sup>(38)</sup> เนื่องจากอนุภาคของทังสเตนคาร์ไบด์ทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดเกรนโตของเนื้อพื้นอะลูมินา แต่เมื่อผสมโคบอลต์ลงไปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ได้ขนาดเกรนใหญ่กว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณโคบอลต์เนื่องจากอนุภาคของทังสเตนคาร์ไบด์ที่อยู่ตามขอบเกรนซึ่งทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดเกรนโตมีน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์มากขึ้นเพราะโคบอลต์มีความแข็งแรงน้อยกว่าทังสเตนคาร์ไบด์และอะลูมินาคือ อะลูมินามีความแข็งแรง (20 GPa)<sup>(21,22)</sup> ทังสเตนคาร์ไบด์มีความแข็งแรง (17-22.5 GPa)<sup>(24)</sup> โคบอลต์มีความแข็งแรง (12.9 GPa)<sup>(10)</sup> ซึ่งวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สูงกว่าจะยับยั้งการเกิดเกรนโตได้ดีกว่า ดังนั้นเมื่อทังสเตนคาร์ไบด์ลดลงการยับยั้งการเกิดเกรนโตก็น้อยลงจึงส่งผลให้ขนาดเกรนของอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ก็ยังคงมีขนาดเกรนเล็กกว่าขนาดเกรนของอะลูมินาตั้งต้น



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเซรามิกประกอบ 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 10wt% WC ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ a) 1500 องศาเซลเซียส และ b) 1600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเซรามิกประกอบ 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ a) 1500 องศาเซลเซียสและ b) 1600 องศาเซลเซียส

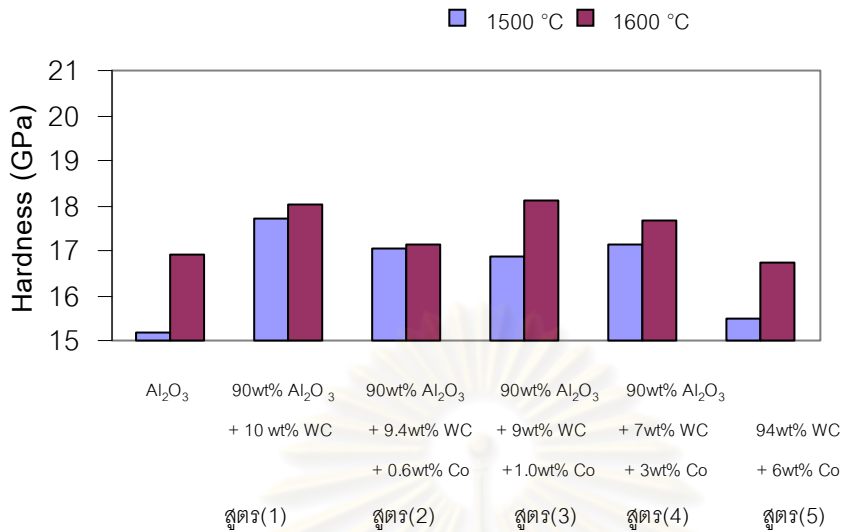
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนอะลูมินาใน วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ และวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

Chemical compositions	average grain size ( $\mu\text{m}$ )	
	1500 °C	1600 °C
Pure $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>(38)</sup>	1.60 $\pm$ 0.28	3.64 $\pm$ 0.71
90wt% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 10wt% WC + 0 wt% Co	0.89 $\pm$ 0.17	1.47 $\pm$ 0.16
90wt% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co	1.23 $\pm$ 0.13	2.40 $\pm$ 0.70
90wt% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 9wt% WC + 1.0wt% Co	1.38 $\pm$ 0.22	2.10 $\pm$ 0.50
90wt% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 7wt% WC + 3.0wt% Co	1.39 $\pm$ 0.35	2.52 $\pm$ 0.24

#### 4.2.3 ความแข็ง

ทดสอบค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์โดยวัดจากรอยกดบนผิวชิ้นงานได้ผลดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ชิ้นงานให้ค่าความแข็งสูงกว่า 1500 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่ 1500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการเผาผนึกยังไม่สูงพอสำหรับอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ สำหรับการเผาผนึกที่ปราศจากแรงดัน ทำให้โครงสร้างมีรูพรุนและหนาแน่นไม่สูงเท่าการเผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งที่เผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส อยู่ที่ประมาณ 18 GPa ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการทดลองโดยการใช้อุณหภูมิเผาชิ้นงานพร้อมกับใช้แรงดัน (Hot Pressing)<sup>(24)</sup>

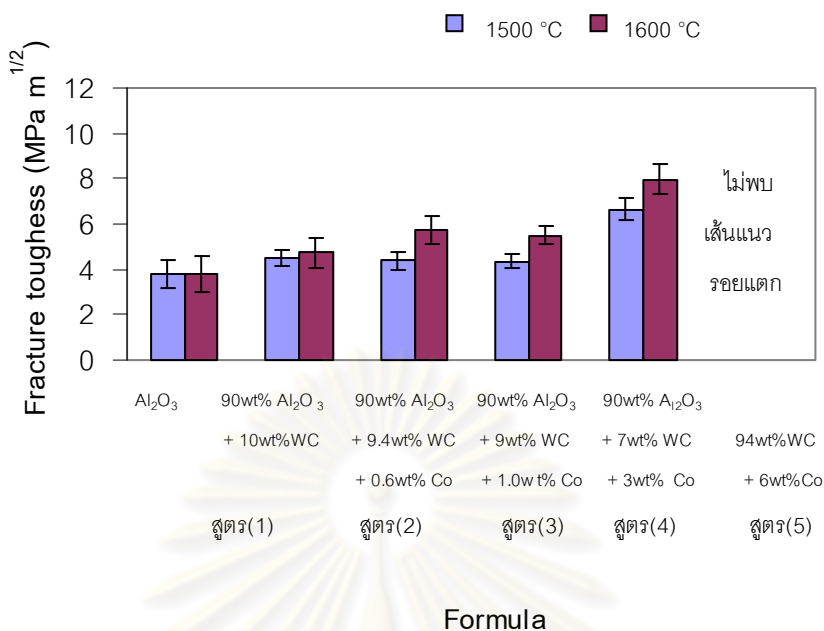


### Formula

รูปที่ 4.9 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$  เฝื่อนึกที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส ที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ

#### 4.2.4 ความเหนียว

รูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความเหนียวจะเห็นว่าเมื่อเผาขึ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ค่าความเหนียวมากขึ้นและความเหนียวเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณโคบอลต์ ส่วนวัสดุเชิงประกอบทั้งสแตนคาร์ไบด์โคบอลต์ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถหาค่าความเหนียวได้ด้วยวิธีเดียวกันนี้เนื่องจากไม่พบเส้นแนวรอยแตก คือเมื่อมีแรงมากจะทำวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเพราะมีความเหนียววัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปเมื่อหยุดให้แรงวัสดุจะไม่กลับสู่สภาพเดิมเนื่องจากมีพฤติกรรมคล้ายโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร<sup>(39)</sup> ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไม่พบเส้นแนวรอยแตกซึ่งมักเกิดกับโลหะที่มีการเผื่อนึกที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.10 ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co เหนือที่อุณหภูมิ 1500 และ 1600 องศาเซลเซียส ที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ

#### 4.3 การเปรียบเทียบทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่เตรียมจากการผสมเองกับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสมรวมกับโคบอลต์มาแล้วในทางการค้า

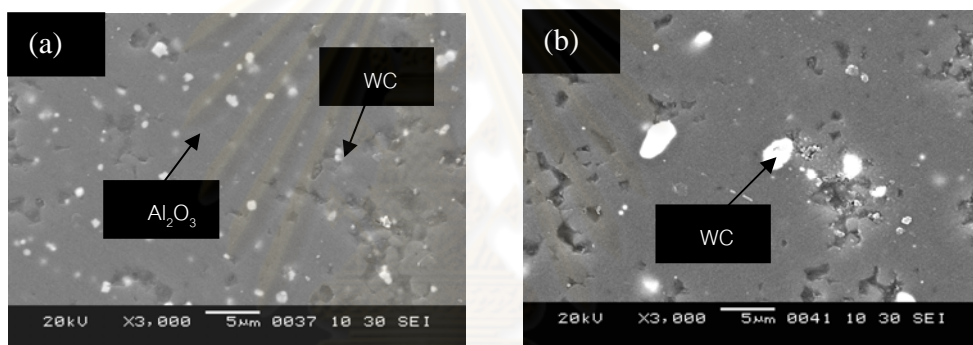
ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่เตรียมจากการผสมเองโดยเป็นการนำ อะลูมินา ทั้งสแตนคาร์ไบด์ และ โคบอลต์มาบดผสมรวมกันอย่างทั่วถึง เปรียบเทียบกับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสมรวมกับโคบอลต์มาแล้วในทางการค้า (94wt% WC + 6wt% Co) แล้วนำผงทางการค้าที่ได้มาบดผสมกับอะลูมินาอีกครั้งโดยใช้สูตรส่วนผสมที่เหมือนกัน 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 9.4 wt% WC + 0.6wt% Co (สูตรที่ 2) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติที่ได้เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง และความเหนียว

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบซึ่งเหนือกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ที่เตรียมจากการผสมเองเปรียบเทียบกับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสมรวมกับโคบอลต์มาแล้วในทางการค้าจากรูปทั้งสอง อนุภาคสี่เหลี่ยมคืออะลูมินาส่วนอนุภาคสี่เหลี่ยมคือทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากการส่องตรวจไม่พบโคบอลต์อาจเป็นเพราะว่าปริมาณโคบอลต์ที่ใส่เข้าไปอาจน้อยเกินไป

รูปที่ 4.12 แสดงผลของทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ที่เตรียมจากการผสมเองเปรียบเทียบกับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสมรวมกับโคบอลต์มาแล้วในทางการค้าซึ่งเหนือกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จากรูปพบว่าค่าความหนาแน่น ความแข็ง ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบซึ่งเหนือกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จากรูปพบว่าในการบดผสมผงวัตถุดิบทั้งสามเองให้ค่าความ

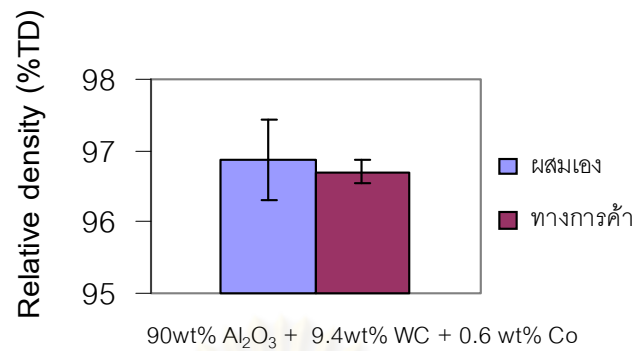


หนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 96.9 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบความหนาแน่นทางทฤษฎี ส่วนการผสมผง  
 วัสดุบะลูมินากับผงวัสดุบทางทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ในทางการค้ำนั้นค่าความหนาแน่น  
 สัมพัทธ์เท่ากับ 96.7 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบความหนาแน่นทางทฤษฎี ซึ่งถือว่าให้ค่าใกล้เคียงกัน  
 มาก สำหรับค่าความแข็งและความเหนียวก็เช่นกันพบว่าในการบดผสมผงวัสดุบทั้งสามเอง  
 เปรียบเทียบกับการผสมผงวัสดุบะลูมินากับผงวัสดุบทางทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ในทาง  
 การค้ำนั้น ให้ค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสำหรับการผสมผงวัสดุบทั้งสามเองกับการผสมผงวัสดุบที่  
 ได้จากทางการค้ำที่องค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกันนั้นส่งผลความแตกต่างเพียงเล็กน้อยต่อค่า  
 ความหนาแน่น ความแข็ง และความเหนียวเนื่องจากบดผสมด้วยวิธีเดียวกัน สำหรับการเตรียม  
 และผสมผงวัสดุบเองนั้นจะทำให้สามารถได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายตรงตามงานที่ต้องการ  
 เพราะสามารถปรับส่วนผสมทางเคมีได้

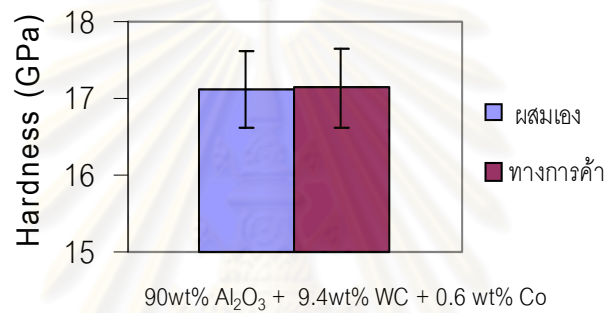


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบด้วย 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 9.4wt% WC + 0.6wt%  
 Co (สูตรที่ 2) ที่ได้จาก (a) ผสมผงวัสดุบเอง และ (b) ผงวัสดุบสำเร็จรูปเผาผนึก  
 ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส

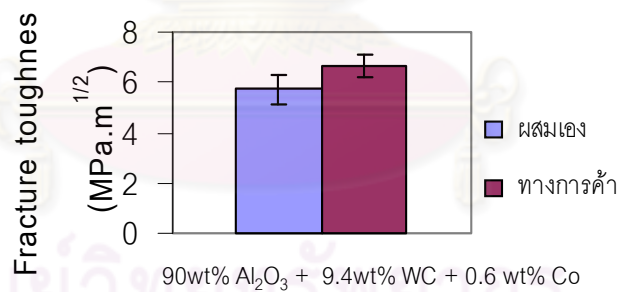
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Formula



Formula



Formula

รูปที่ 4.12 ความหนาแน่น ความแข็ง และความเหนียว ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ของ 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 9.4wt% WC + 0.6wt% Co สูตรที่ 2 ผสมผงวัตถุดิบทั้งสามเอง เปรียบเทียบกับผสมผงวัตถุดิบทางการค้า

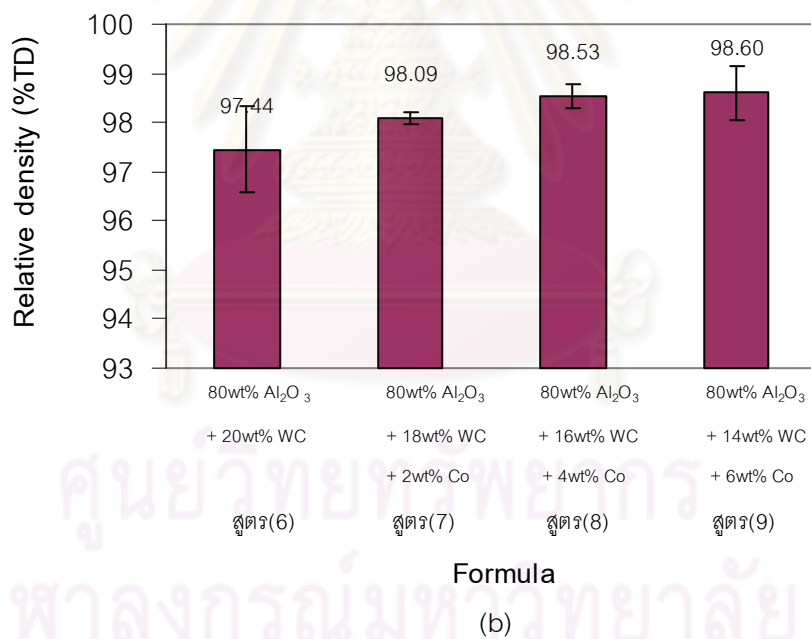
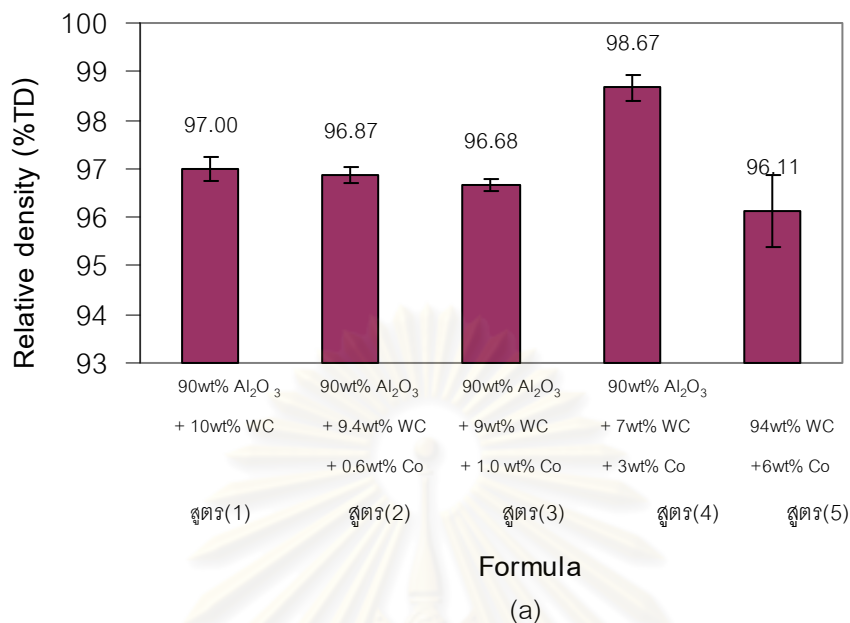
#### 4.4 ผลของโคบอลต์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์

ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของโคบอลต์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์โดยแบ่งการทดสอบเป็นสองส่วน คือส่วนแรกจะทดลองโดยใช้อะลูมินาต่อทังสเตนคาร์ไบด์เป็น 90 ต่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยที่ใน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ซึ่งมีโคบอลต์อยู่ 0.6 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่สองจะทดลองโดยใช้อะลูมินาต่อทังสเตนคาร์ไบด์เป็น 80 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยที่ใน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ซึ่งมีโคบอลต์อยู่ 2 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส

##### 4.4.1 ความหนาแน่น

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าความหนาแน่นแต่ละสูตรไม่ต่างกันมาก เมื่อใส่โคบอลต์เข้าไปในอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์และเมื่อใส่โคบอลต์ปริมาณมากขึ้นความหนาแน่นไม่เพิ่มตามปริมาณโคบอลต์เนื่องจากใช้สารตั้งต้นที่มีอนุภาคขนาดละเอียดและมีความบริสุทธิ์สูง (ทำให้มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากแต่ละสูตรผสม) จึงส่งผลให้ความหนาแน่นไม่แตกต่างกันมาก<sup>(24)</sup> และเนื่องจากมีอนุภาคละเอียดที่กระจายอยู่ที่ขอบเกรนซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของขอบเกรนและการแพร่ของมวลทำให้ความหนาแน่นเกิดขึ้นได้ช้า แต่ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยรวมก็ถือว่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใส่โคบอลต์ในอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์และให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงถึง 98 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบความหนาแน่นทางทฤษฎี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

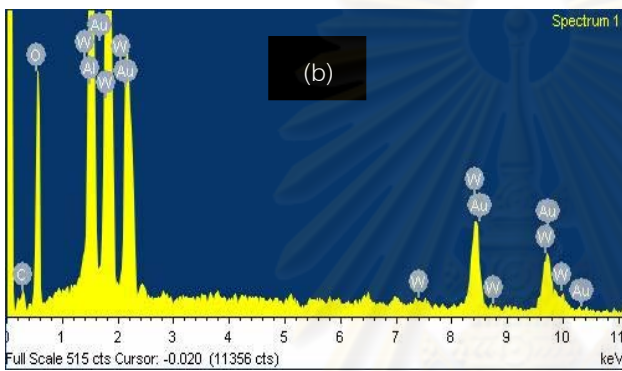
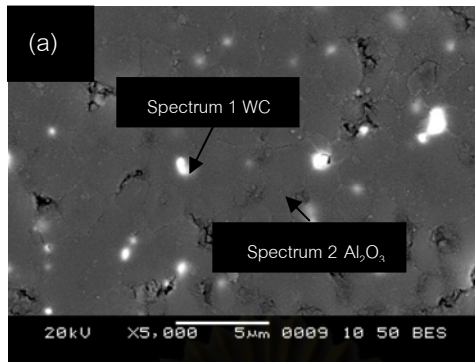


รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co เผาฉนวนที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a) 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 10wt% WC-Co และ (b) 80wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 20wt% WC-Co

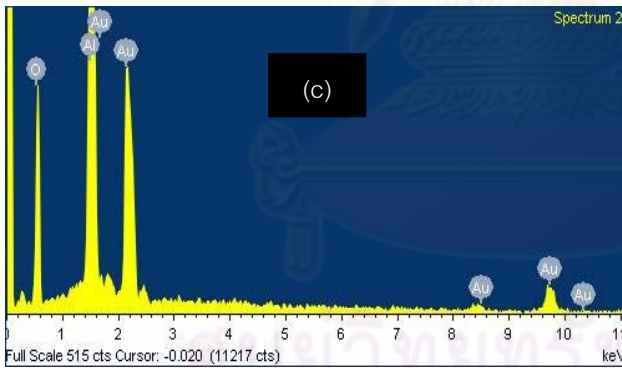
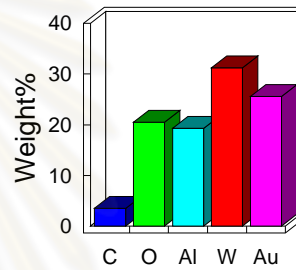
#### 4.4.2 โครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์โดยไม่เติมโคบอลต์ซึ่งผ่านการกัดผิวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส จากการตรวจด้วยเทคนิค EDS พบว่าบริเวณพื้นอนุภาคสีสว่างก็คือ ทังสเตนคาร์ไบด์และบริเวณพื้นที่สีเทาคือ อะลูมินาซึ่งบริเวณอนุภาคอนุภาคสีสว่าง (spectrum 1) ประกอบด้วยธาตุ ทังสเตน คาร์บอน ซึ่งอาจรวมเป็น ทังสเตนคาร์ไบด์ และมีธาตุ อะลูมิเนียมและออกซิเจนซึ่งอาจรวมเป็นอะลูมินาบริเวณเนื้อพื้นสีเทา (spectrum 2) ประกอบด้วยธาตุ อะลูมิเนียมและออกซิเจนซึ่งอาจรวมเป็นอะลูมินา จากรูปที่ 4.14 (a) จะพบว่าทังสเตนคาร์ไบด์กระจายตัวในเนื้อพื้นของอะลูมินาอย่างสม่ำเสมอโดยจะอยู่ที่ขอบเกรน

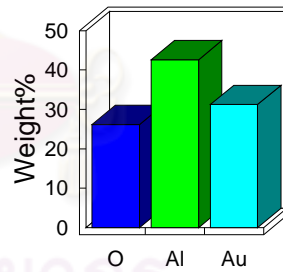
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ หลังจากตรวจสอบปริมาณโดยน้ำหนักของสารด้วยเทคนิค EDS เนื้อพื้นสีเทาก็คือทังสเตนคาร์ไบด์ (spectrum 1) ประกอบด้วยธาตุ ทังสเตน คาร์บอน อะลูมิเนียม ออกซิเจน และ โคบอลต์ ส่วนพื้นสีดำก็คือ Co (spectrum 2) ประกอบด้วยธาตุ ทังสเตน คาร์บอน อะลูมิเนียม ออกซิเจน และ โคบอลต์ รูปที่ 4.15 (c) ซึ่งพบธาตุอะลูมิเนียม และ ออกซิเจนคาดว่าน่าจะเจือปนมาจากขั้นตอนการบดผสมชิ้นงานเนื่องจากใช้ลูกบดอะลูมินาและรูปที่ 4.16 บริเวณอนุภาคสว่าง(spectrum 1) คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยธาตุ ทังสเตน คาร์บอน อะลูมิเนียม ออกซิเจน และ โคบอลต์ ซึ่งอาจรวมเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ อะลูมินา และโคบอลต์ บริเวณเนื้อพื้นสีเทา(spectrum 2) คือ อะลูมินา ประกอบด้วยธาตุ อะลูมิเนียมและออกซิเจนส่วนบริเวณอนุภาคสีเทาสว่าง (spectrum 3) คือ อะลูมินา โครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ พบว่าโครงสร้างหลังการเผาอ่อนช้างหนาแน่นและจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS สุ่มจุดทดสอบไม่โดนอนุภาคของ Co อาจเนื่องมาจากโคบอลต์มีปริมาณน้อยอย่างไรก็ตามก็ยังคงสามารถยืนยันได้ว่ามีปริมาณโคบอลต์ผสมอยู่จากการที่พบเฟสของโคบอลต์หลังจากตรวจสอบปริมาณโดยน้ำหนักของสาร



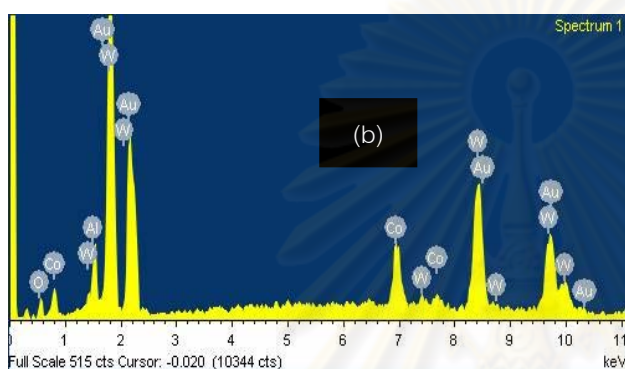
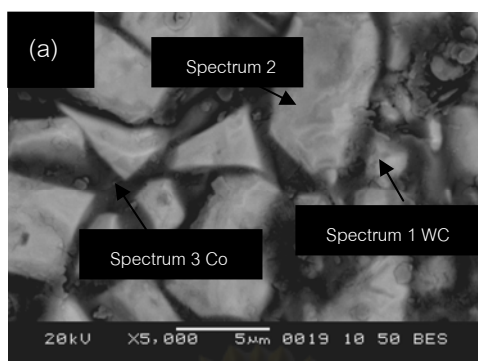
Quantitative results



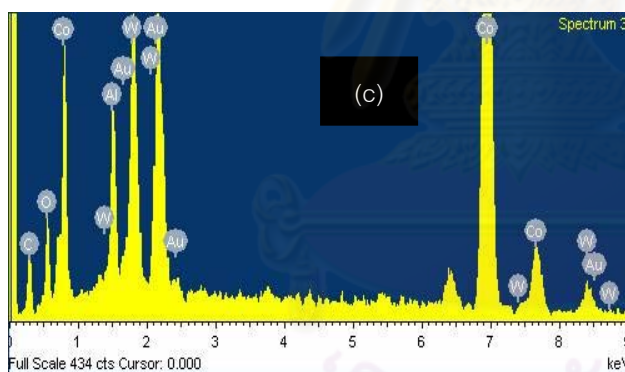
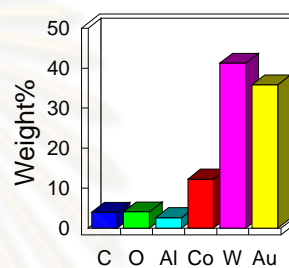
Quantitative results



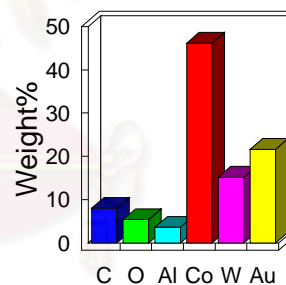
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วย 90wt%  $Al_2O_3$  + 10wt% WC  
 a) จุดที่หาค่าประกอบทางเคมี b) บริเวณอนุภาคสีขาว c) บริเวณเนื้อพื้นสีเทา



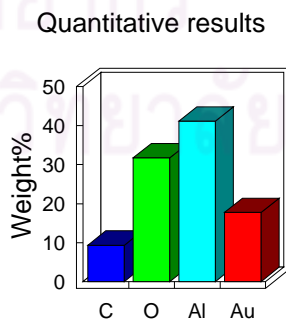
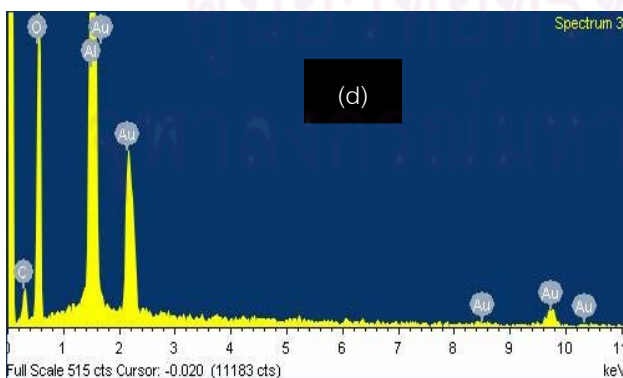
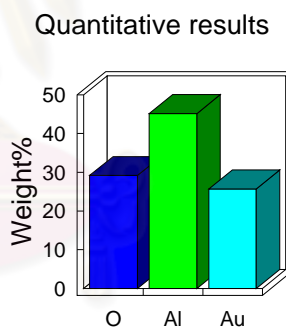
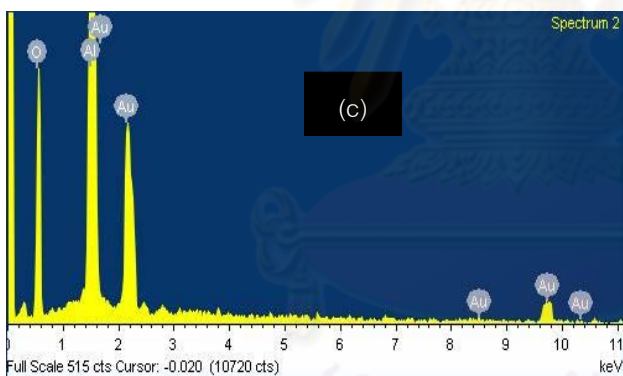
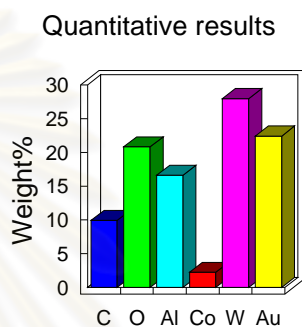
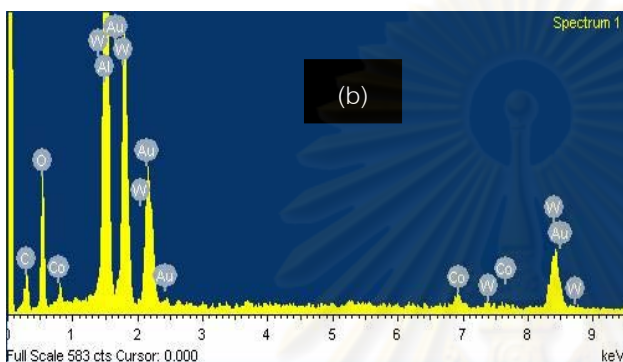
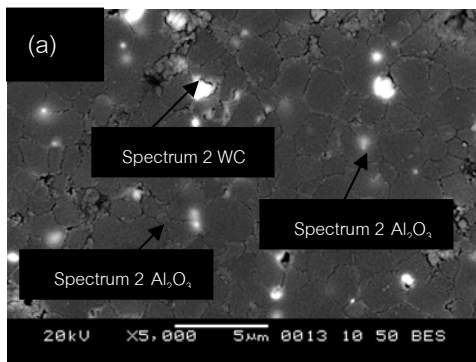
Quantitative results



Quantitative results



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วย 94wt% WC + 6wt% Co a) จุดที่หาค่าประกอบทางเคมี b) บริเวณอนุภาคสีขาว c) บริเวณเนื้อพื้นสีเทา



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 9.4wt% WC + 0.6wt% Co

- a) จุดที่หาองค์ประกอบทางเคมี
- b) บริเวณอนุภาคสว่าง
- c) บริเวณเนื้อพื้นสีเทา
- d) บริเวณอนุภาคสีเทาสว่าง

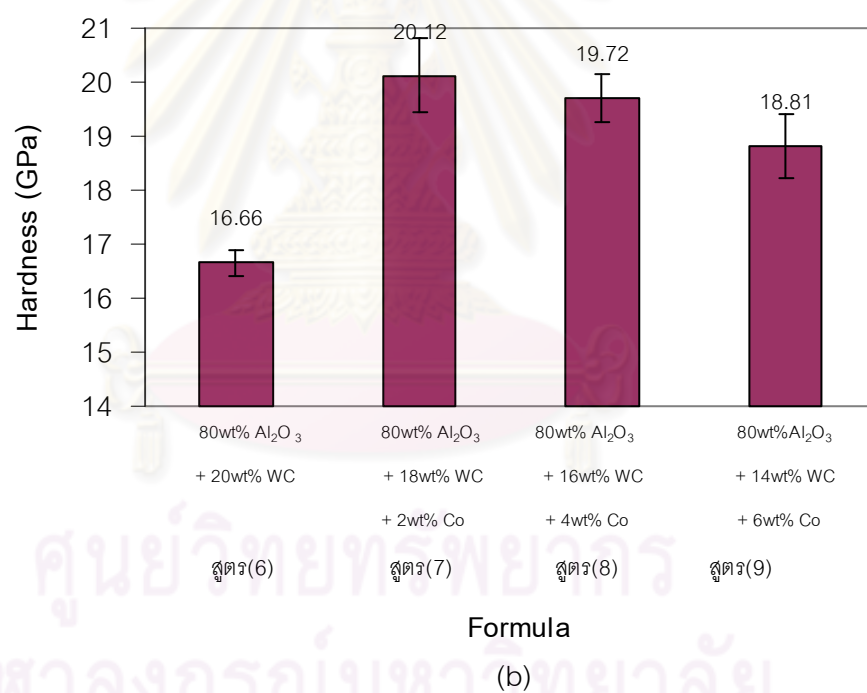
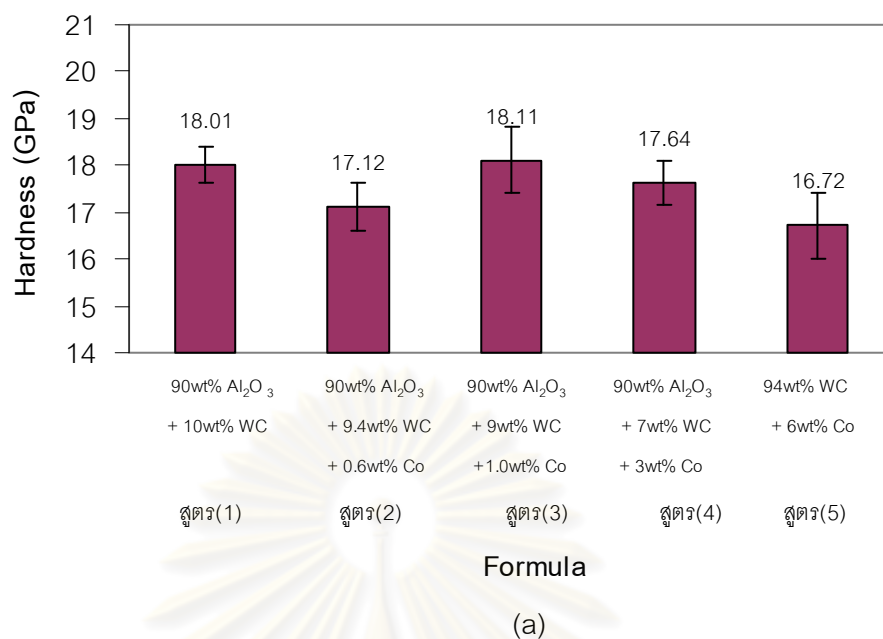


#### 4.4.3 ความแข็ง

จากรูปที่ 4.17 พบว่าที่ส่วนผสม 90wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 10wt% WC-Co ให้ค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 18 GPa และดูเหมือนว่าค่าความแข็งไม่เพิ่มตามปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะใส่โคบอลต์เข้าไปในปริมาณน้อยเลยเป็นการลดปริมาณของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งมากกว่าลง ส่วนที่ส่วนผสม 80wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 20wt% WC-Co เมื่อใส่โคบอลต์เข้าไปในอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 17 GPa เป็น 20 GPa ที่องค์ประกอบทางเคมี 80wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 18wt% WC + 2wt% Co อาจเนื่องมาจากความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิของทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ทำหน้าที่ขัดขวางการโตของอะลูมินาทำให้มีขนาดเกรนลดลงจึงทำให้ได้ความแข็งสูงเมื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ<sup>(40)</sup>



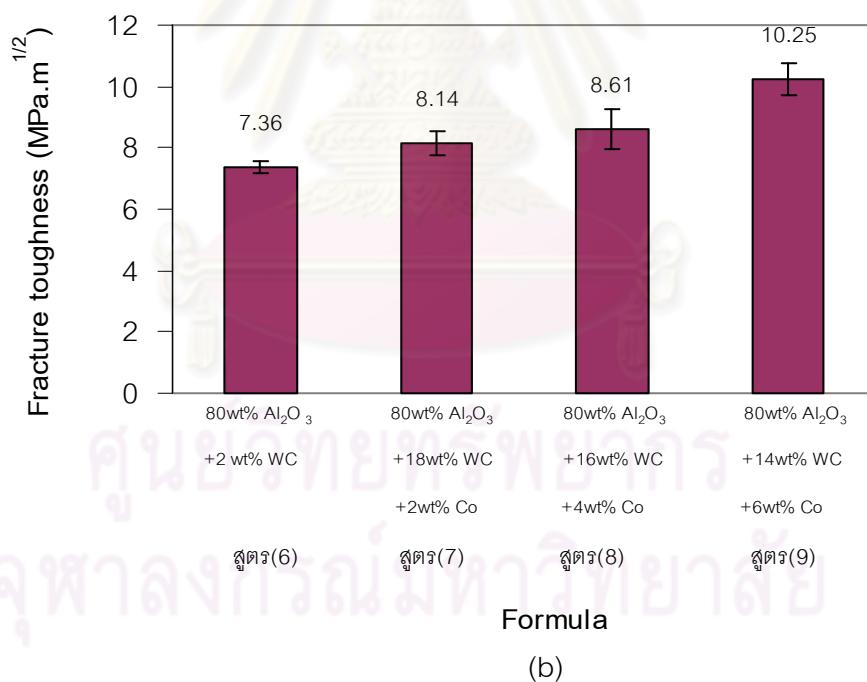
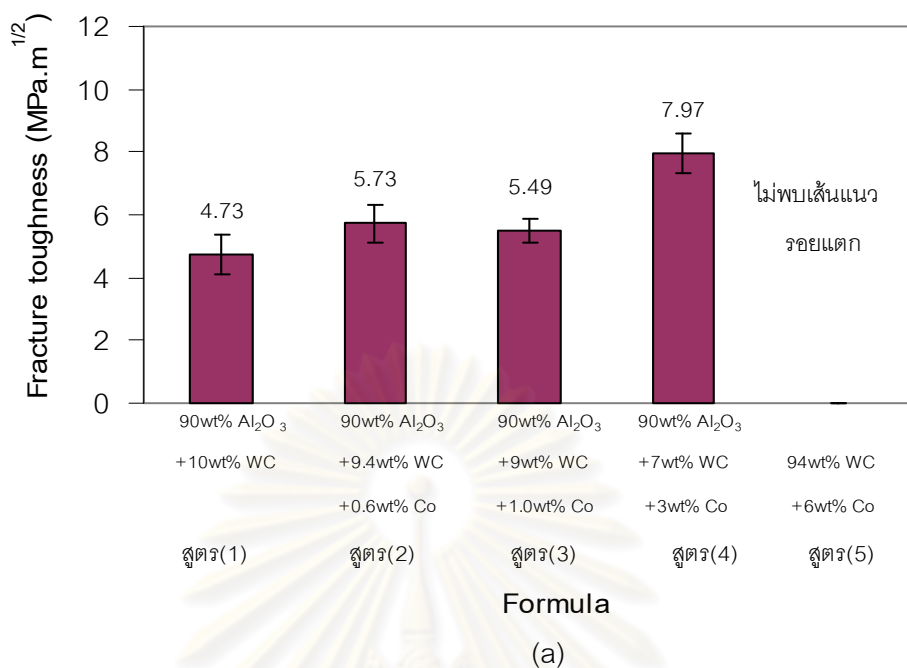
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



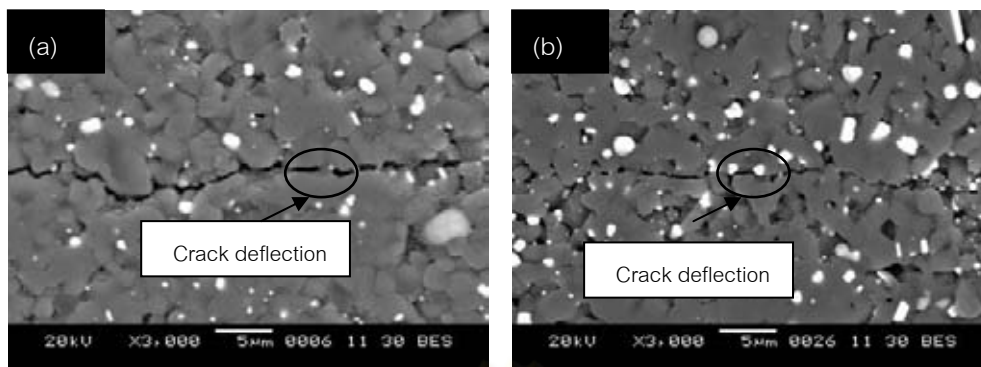
รูปที่ 4.17 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส  
ที่องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a) 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 10wt% WC-Co  
(b) 80wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 20wt% WC-Co

#### 4.4.4 ความเหนียว

ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์แสดงผลในรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อใส่โคบอลต์เข้าไปในอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 10 MPa.m<sup>1/2</sup> และเมื่อปริมาณโคบอลต์มากขึ้นส่งผลให้ความเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม สำหรับงานวิจัยนี้การที่ความเหนียวเพิ่มขึ้นอาจเกิดการหักเหของรอยแตก (crack deflection)<sup>(24)</sup> ก็คือในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบจะมีเฟสเสริมแรงกระจายตัวในเฟสเนื้อพื้นตามขอบเกรน เมื่อมีแรงกระทำที่ชิ้นงาน ชิ้นงานรับแรงไม่ไหวก็จะเริ่มเกิดรอยแตกเมื่อเส้นแนวรอยแตกวิ่งไปเจออนุภาคของเฟสเสริมแรงทังสเตนคาร์ไบด์หรือโคบอลต์ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอยแตกก็ไม่สามารถแตกต่อได้จึงต้องแตกอ้อมอนุภาคของตัวทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ซึ่งกว่าจะแตกอ้อมได้รอยแตกก็อ่อนตัวลงก่อนด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องในรูปที่ 4.19 แสดงการเกิดการหักเหของรอยแตก อย่างไรก็ตามความเหนียวอาจเกิดจากพฤติกรรมที่คล้ายโลหะที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของอนุภาคเสริมแรงโคบอลต์เมื่อได้รับความเค้นที่ปลายรอยแตกก็อาจเป็นไปได้<sup>(39)</sup>



รูปที่ 4.18 ความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสที่ องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a) 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 10wt% WC-Co  
(b) 80wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 20wt% WC-Co



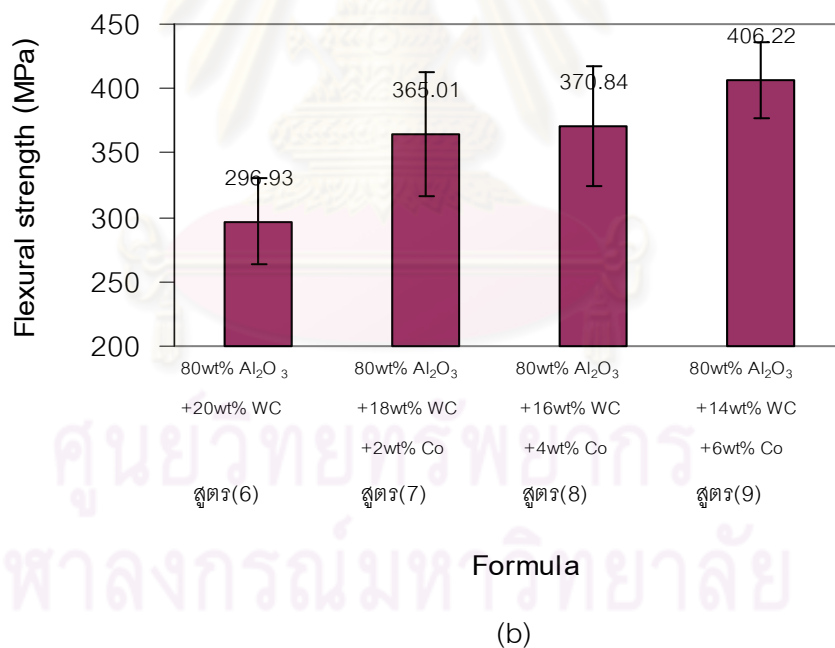
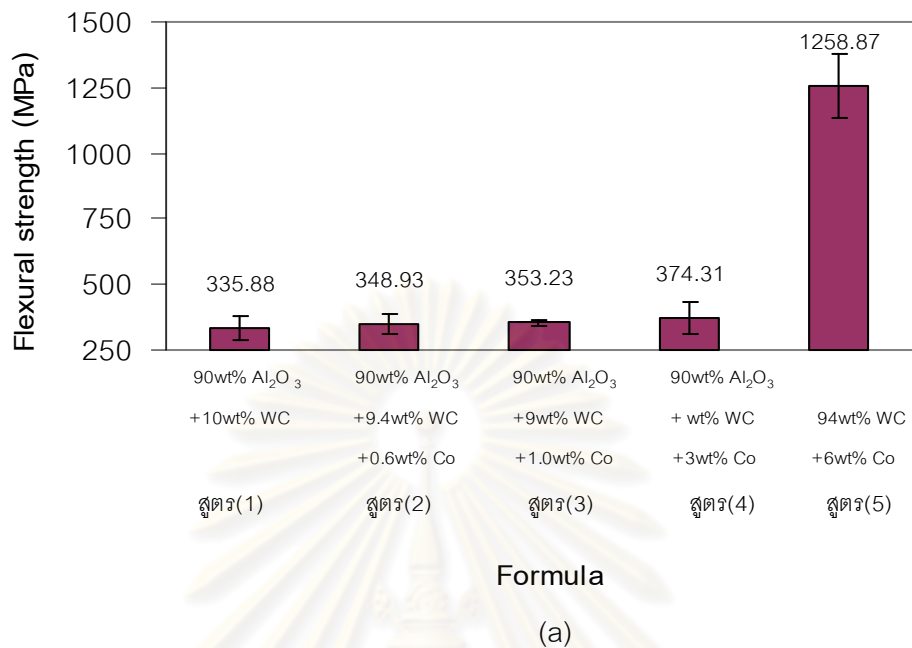
รูปที่ 4.19 การเกิดการหักเหของรอยแตกของชิ้นงานเผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส

a) 80wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 20wt% WC b) 80wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 14wt% WC + 6wt% Co

#### 4.4.5 ความแข็งแรง

ความแข็งแรงทดสอบได้ผลดังรูปที่ 4.20 พบว่า ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ให้ค่าความแข็งแรงสูงถึง 1200 MPa หลังจากใส่ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ในอะลูมินาก็ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณโคบอลต์เพราะเมื่อใส่วัสดุเสริมแรงโคบอลต์ที่มีความแข็งแรงสูงลงไปวัสดุเนื้อพื้นปริมาณมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามเนื่องจากเป็นสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่สมบัติของวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับปริมาณและสมบัติของวัสดุตั้งต้นที่ใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสที่ องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (a) 90wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 10wt% WC-Co  
(b) 80wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 20wt% WC-Co

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาเกี่ยวผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น อัตราส่วนระหว่าง อะลูมินากับอนุภาคเสริมแรง ปริมาณโคบอลต์และอุณหภูมิในการเผา ต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง ความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบสำหรับ ประยุกต์ใช้เพื่องานวัสดุตัดซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) ในการเติมอนุภาคของ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ในเนื้อพื้นอะลูมินาส่งผลให้ความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น ได้ค่าสูง ถึง 10.25 MPa.m<sup>1/2</sup> ซึ่งความเหนียวที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการหักเหของ รอยแตก หรืออาจเกิดจากจากพฤติกรรมที่คล้ายโลหะของอนุภาคเสริมแรงโคบอลต์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรเมื่อได้รับความเค้นที่ปลายรอยแตกก็อาจเป็นไปได้

2) ในการทดสอบผลของอุณหภูมินั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาผนึกของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์ คือ 1600 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่น ความแข็ง และความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ให้มีค่าสูงขึ้น

4) อะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ มีค่าความแข็ง 17-20 GPa

5) ความเหนียวอยู่ในช่วง 5-10 MPa.m<sup>1/2</sup> และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นโดยที่ให้ค่าสูงที่สุดที่องค์ประกอบทางเคมี 80wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 20wt% WC-Co

6) ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ให้ค่าความแข็งแรง ความเหนียว และความแข็งแรง ที่สามารถเตรียมเป็นวัสดุตัดได้ แต่ต้องเลือกเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้เครื่องมือตัดที่มีประสิทธิภาพ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติทางด้านความต้านทานต่อการสึกกร่อนของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์เนื่องจากมีความสำคัญต่อสมบัติของเครื่องตัด

5.2.2 .ในการบดผสมผงวัตถุดิบต้องเลือกใช้ลูกบดให้เหมาะสมเพื่อป้องกันสิ่งเจือปนซึ่ง อาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลได้

## รายการอ้างอิง

- (1) Whitney, E.D. Ceramic cutting tools : Materials, Development, and performance. United States of America: Noyes Publications, 1994.
- (2) Acchar, W., Martinelli, A.E., Vieira, F.A. and Cairo, C.A.A. Sintering behaviour of alumina-tungsten carbide composites. Materials Science and Engineering A 284 (2000): 84-87.
- (3) Wang, L., Shi, J.L., Hua, Z.L., Gao, J.H. and Yan, D.S. The influence of addition of WC particles on mechanical properties of alumina-matrix composite. Materials Letters, 50 (2001): 179-182.
- (4) Shwartz, M.M. Composite materials, Volume I : Properties, nondestructive testing and repair. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997.
- (5) Acchar, W. and Fonseca, J.L. Sintering behavior of alumina reinforced with (Ti,W) carbides. Materials Science and Engineering A, 371 (2004): 382–38.
- (6) Acchar, W., Gomes, U.U., Kaysser, W.A. and Goring, J. Strength Degradation of a Tungsten Carbide-Cobalt Composite at Elevated Temperatures. Materials Science and Engineering, 43 (1999): 27-32.
- (7) Walid, M.D., Kyong, H.L., Hee, S.P. and Soon, H.H. Effect of liquid phase composition on the microstructure and properties. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 27 (2009): 83–89.
- (8) เทคโนโลยีการตัดเฉือนวัสดุ[Online]. Available from:  
<http://www.viboon.org/2010/02/14/%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%89%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%B1-3/> [2011, january 18]
- (9) Grzesik, W. Advanced machining processed of metallic materials. London: Elsevier, 2008.
- (10) Boch, P. and Niepce, J.C. Ceramic Materials : Processes, Properties and Applications. United States of America: Cataloguing in Publications, 1994.



- (11) สิริพรรณ นิลไพรัช. เทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือตัด : เครื่องตัดโลหะ นวัตกรรมทางเทคโนโลยี. วารสารโลหะ วัสดุ และ แม่ (2539): 8-20.
- (12) Kitiwan, M. Preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC composites using microwave energy. Master's Thesis, Department of Material Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2004.
- (13) Brooks, K.J.A. World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard materials. UK: Publishing by International Carbide Data, 1992.
- (14) แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2549.
- (15) ศุภสโรช หมั่นสิทธิ์. วัสดุเชิงฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ดี, 1995.
- (16) จิตติ รินเสนา. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- (17) Shwartz, M.M. Composite materials, Volume II : Processing, fabrication, and applications. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997.
- (18) Ring, T.A. Fundamentals of ceramic powder processing and synthesis. California: Academic press, 1996
- (19) สุรพงษ์ เพชรวัตร. ผลของเซอร์โคเนียที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-โครเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- (20) Kitiwan, M. Preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC composites using microwave energy. Master's Thesis, Department of Material Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2004.
- (21) อนรรตน์ ภูวานคำ. การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-มุลไลต์-เซอร์โคเนีย สำหรับงานทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548
- (22) Nicholas, P.C. Handbook of Ceramics and Composites (Vols 1). New York: Marcel Dekker, 1990.
- (23) Acchar, W. and Segadaes, A.M. Properties of sintered alumina reinforced with niobium carbide. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 27 (2009): 427-430.

- (24) Acchar, W., Cairo, C.A. and Segadaes, A.M. Effect of tungsten carbide additions on the microstructure and properties of hot-pressed alumina. Materials Science and Engineering A 406 (2005): 74–77.
- (25) Worrall, W.E. Clays and ceramic raw materials. (2<sup>nd</sup> ed). London: Elsevier applied Science, 1986.
- (26) Weimer, A. W. Carbide, Nitride and boride materials synthesis and processing. United States of America: Chapman & Hall, 1997.
- (27) non-ferrous metals[Online]. Available from:  
<http://www.industrial.cmru.ac.th/Civil/wechsawan/materials/ch07/ch07.htm> [2011, February 10]
- (28) Jia, C., Sun, L., Tang, H. and Qu, X. Hot pressing of nanometer WC-Co powder. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 25 (2007): 53–56.
- (29) Tai, W.P. and Watanabe, T. Fabrication and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WC-Co Composites by vacuum hot pressing. Journal of the American Ceramic Society 81 (1998): 1673-1676.
- (30) Na Nakorn, P. Development of alumina substrate for peltier element. Master's Thesis, Department of Materials Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2003.
- (31) Panmaung, K. Development of alumina - zirconia composite for milling ball. Master's Thesis, Department of Materials Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2003.
- (32) American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Methods for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramic, ASTM C1327-03, United State: ASTM, 2005.
- (33) วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการดำเนินงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- (34) โคบอลต์[Online]. Available from:  
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%95%E0%B9%8C> [2011, March 5]

- (35) American Society for Testing and Material (ASTM), Standard Test Methods for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, ASTM C1161-02c, United State: ASTM, 2005.
- (36) American Society for Testing and Material (ASTM), Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM E112-96, United State: ASTM, 2004.
- (37) Zhang, J. and Iwasa, M. Fabrication of Hydroxyapatite – Zirconia Composites for Orthopedic Applications. Journal of the American Ceramic Society 89 (2006): 3348-3355
- (38) จิราพร บุญพอ. ผลของสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของวัสดุเซรามิกคอมโพสิทและทั้งสแตนคราไบต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- (39) Roy, W.R. Mechanical Properties of Composite Material Mechanics. New York: Marcel Dekker, 2000.
- (40) Huang, S., Vanmeensel, K., Biest, O. V. d. and Vleugels, J. Pulsed electric current Sintering and characterization of ultrafine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WC composites. Materials Science and Engineering A 527 (2010): 584-589.

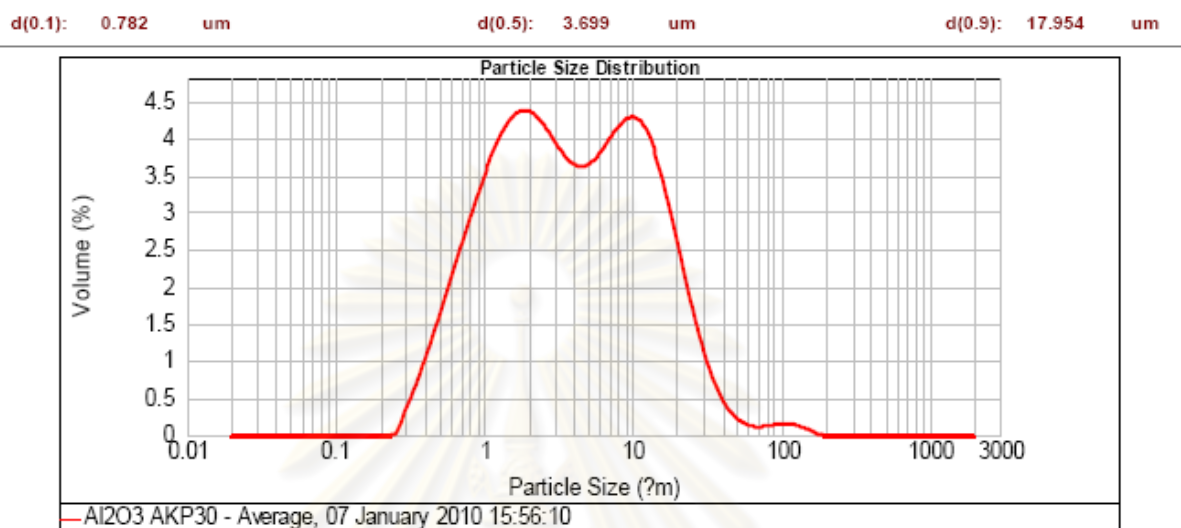


ภาคผนวก

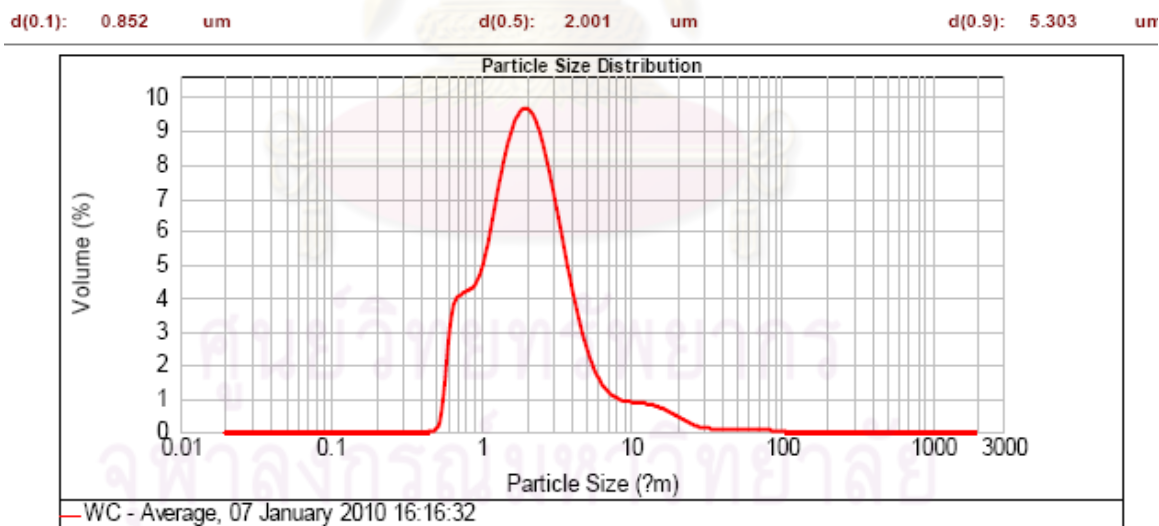
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

แสดงการกระจายขนาดอนุภาคโดยใช้โดยหลักการ Laser Scattering โดยใช้เครื่อง Particle Size Analyzer รุ่น 2000 ผลิตโดยบริษัท Malvern

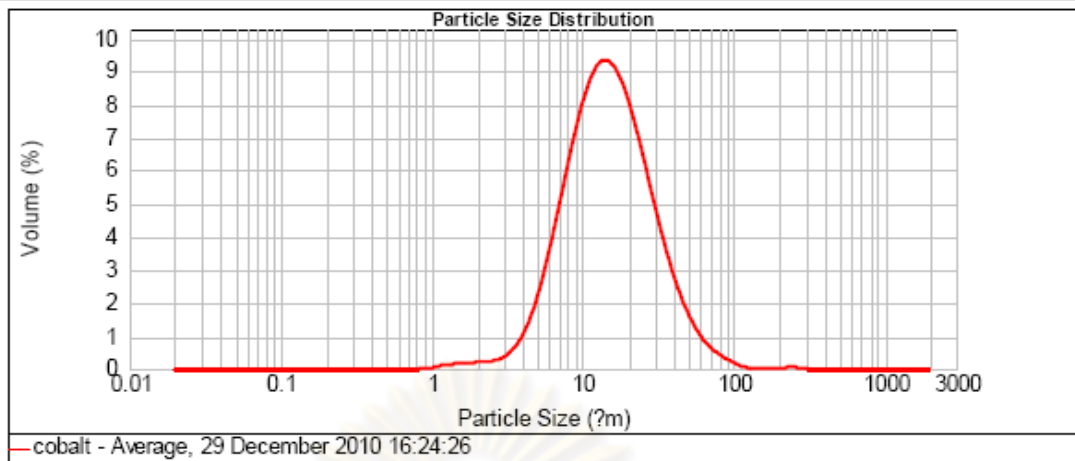


รูปที่ ก-1 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา



รูปที่ ก-2 การกระจายขนาดอนุภาคของทังสเตนคาร์ไบด์

d(0.1): 6.385 um d(0.5): 14.429 um d(0.9): 34.251 um



รูปที่ ก-3 การกระจายขนาดอนุภาคของโคบอลต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS หมายเลข 00-046-1212

Pattern : 00-046-1212		Radiation = 1.540598		Quality : High		
$\text{Al}_2\text{O}_3$  Aluminum Oxide Corundum, syn		2 $\theta$	i	h	k	l
		25.579	45	0	1	2
		35.153	100	1	0	4
		37.777	21	1	1	0
		41.676	2	0	0	6
		43.356	66	1	1	3
		46.178	1	2	0	2
		52.550	34	0	2	4
		57.497	89	1	1	6
		59.740	1	2	1	1
		61.118	2	1	2	2
		61.300	14	0	1	8
		66.521	23	2	1	4
		68.214	27	3	0	0
		70.420	1	1	2	5
		74.299	2	2	0	8
		76.871	29	1	0	10
		77.228	12	1	1	9
		80.422	1	2	1	7
		80.700	2	2	2	0
		83.217	1	3	0	6
		84.359	3	2	2	3
		85.143	1	1	3	1
		86.363	2	3	1	2
		86.503	3	1	2	8
		88.997	9	0	2	10
Lattice : Rhombohedral S.G. : R-3c (167)		Mol. weight = 101.96 Volume [CD] = 254.81				
a = 4.75870		Dx = 3.967				
c = 12.99290	Z = 6					
Sample source or locality: The sample is an alumina plate as received from ICDD. General comments: Unit cell computed from $d_{001}$ . Optical data: A=1.7604, B=1.7686, Sign=- Data collection flag: Ambient.						
Huang, T., Parrish, W., Masciocchi, N., Wang, P., Adv. X-Ray Anal., volume 33, page 285 (1990)						
Radiation : CuK $\alpha$ 1 Lambda : 1.54056 SS/FOM : F25=357(0.0028,25)		Filter : Not specified d-sp : Diffractometer				

ตารางที่ ข-2 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของ WC ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS  
หมายเลข 03-065-4539

Pattern : 03-065-4539		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
WC		2th	i	h	k	l
		31.678	441	0	0	1
		35.722	999	1	0	0
		48.411	850	1	0	1
Carbon Tungsten		64.179	174	1	1	0
		65.939	53	0	0	2
		73.292	177	1	1	1
		75.675	85	2	0	0
		77.316	159	1	0	2
		84.298	130	2	0	1
		99.016	88	1	1	2
		108.482	64	2	1	0
		109.429	10	0	0	3
		110.173	62	2	0	2
		117.715	128	2	1	1
		121.385	62	1	0	3
		133.892	30	3	0	0
		147.285	49	3	0	1
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 195.86				
S.G. : P-6m2 (187)		Volume [CD] = 20.62				
a = 2.90000		Dx = 15.774				
c = 2.83100	Z = 1	Moor = 15.30				
<p>NIST M&amp;A collection code: L 50988 ST1384 0            Temperature factor: TF Isotropic TF given by author            Sample preparation: The sample was prepared by carburizing the tungsten film under CO atmosphere at 800-1000C.            Remarks from ICSD/CSD: thin films.            Data collection flag: Ambient.</p>						
<p>Butorina, L. N., Sov. Phys. Crystallogr. (Engl. Transl.), volume 5, page 218 (1980)            Calculated from NIST using POWD-12++</p>						
Radiation : CuKa1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				
SS/FOM : F17=1000(0.0001,17)						



## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ขนาดเกรนและความหนาแน่นของตัวอย่าง

Temperature (°c)	Specimen	Average grain size ( $\mu\text{m}$ )	Relative density (%TD)
1500	Pure $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>(38)</sup>	1.60 $\pm$ 0.28	97.61 $\pm$ 0.20
	10wt% WC + 0wt% Co	0.89 $\pm$ 0.17	94.29 $\pm$ 0.26
	9.4wt% WC + 0.6wt% Co	1.23 $\pm$ 0.13	94.09 $\pm$ 0.18
	9wt% WC + 1.0wt% Co	1.38 $\pm$ 0.22	94.14 $\pm$ 0.12
	7wt% WC + 3.0wt% Co	1.39 $\pm$ 0.35	94.74 $\pm$ 0.28
	94wt% WC + 6wt% Co	-	94.76 $\pm$ 0.74
1600	Pure $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>(38)</sup>	3.64 $\pm$ 0.71	99.21 $\pm$ 0.23
	10wt% WC + 0wt% Co	1.47 $\pm$ 0.16	97.00 $\pm$ 0.61
	9.4wt% WC + 0.6wt% Co	2.40 $\pm$ 0.7	96.87 $\pm$ 0.76
	9wt% WC + 1.0wt% Co	2.10 $\pm$ 0.5	96.68 $\pm$ 0.36
	7wt% WC + 3.0wt% Co	2.52 $\pm$ 0.24	98.67 $\pm$ 0.24
	94wt% WC + 6wt% Co	-	96.11 $\pm$ 0.04
	20wt% WC + 0wt% Co	-	97.44 $\pm$ 0.87
	18wt% WC + 2wt% Co	-	98.09 $\pm$ 0.11
	16wt% WC + 4wt% Co	-	98.53 $\pm$ 0.25
	14wt% WC + 6wt% Co	-	98.60 $\pm$ 0.54

ตารางที่ ค-2 สมบัติเชิงกลของตัวอย่าง

Temperature (°c)	Specimen	Vickers hardness (GPa)	Fracture toughness (MPa.m <sup>1/2</sup> )	Flexural strength (MPa)
1500	Pure Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(38)</sup>	15.18 ± 0.75	3.84 ± 0.58	325.70 ± 43.39
	10wt% WC + 0wt% Co	17.73 ± 0.38	4.50 ± 0.36	-
	9.4wt% WC + 0.6wt% Co	17.20 ± 0.50	4.39 ± 0.42	-
	9wt% WC + 1.0wt% Co	16.87 ± 0.71	4.35 ± 0.34	-
	7wt% WC + 3.0wt% Co	16.92 ± 0.47	4.42 ± 0.22	-
	94wt% WC + 6wt% Co	15.47 ± 0.69	-	-
1600	Pure Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(38)</sup>	16.85 ± 0.80	3.78 ± 0.76	202.38 ± 31.45
	10wt% WC + 0wt% Co	18.01 ± 0.48	4.47 ± 0.64	335.88 ± 45.59
	9.4wt% WC + 0.6wt% Co	17.12 ± 0.32	5.73 ± 0.59	348.93 ± 38.08
	9wt% WC + 1.0wt% Co	18.11 ± 0.35	5.49 ± 0.40	353.23 ± 14.80
	7wt% WC + 3.0wt% Co	17.64 ± 0.53	7.97 ± 0.64	374.31 ± 61.94
	94wt% WC + 6wt% Co	16.72 ± 0.40	-	1258.87 ± 122.6
	20wt% WC + 0 wt% Co	16.66 ± 0.25	7.36 ± 0.21	296.87 ± 33.87
	18wt% WC + 2wt% Co	20.12 ± 0.69	8.14 ± 0.40	365.00 ± 48.32
	16wt% WC + 4wt% Co	19.72 ± 0.44	8.61 ± 0.67	370.84 ± 45.98
	14wt% WC + 6wt% Co	18.81 ± 0.61	10.25 ± 0.53	406.22 ± 29.25

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรษยา ไชยโคตร เกิดเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์ จบการศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2550 หลังจากนั้นศึกษาต่อด้านวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีเซรามิกที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจบการศึกษาในเดือน พฤษภาคม ปี พ.ศ. 2554

ในระหว่างการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษานั้น ได้ไปนำเสนอผลงานทางวิชาการในรูปแบบ Oral presentation ในการประชุมทางวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35 (วทท 35) ระหว่างวันที่ 15-17 ตุลาคม พ.ศ. 2552 มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี และนำเสนอผลงาน ในการเข้าร่วมการประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 ระหว่างวันที่ 26-27 สิงหาคม 2553 ที่โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น และได้รับการตีพิมพ์ผลงาน Journal of Metals, Materials and Mineral, ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 ธันวาคม 2553 หน้า 5-8



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย