

รหัสโครงการ SUT7-708-52-12-55



## รายงานการวิจัย

### การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมีย ด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย

(Improvement of Mechanical Properties of Alumina-Chromia  
with Zirconia Particles)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-708-52-12-55



## รายงานการวิจัย

### การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมีย ด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย

(Improvement of Mechanical Properties of Alumina-Chromia  
with Zirconia Particles)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552

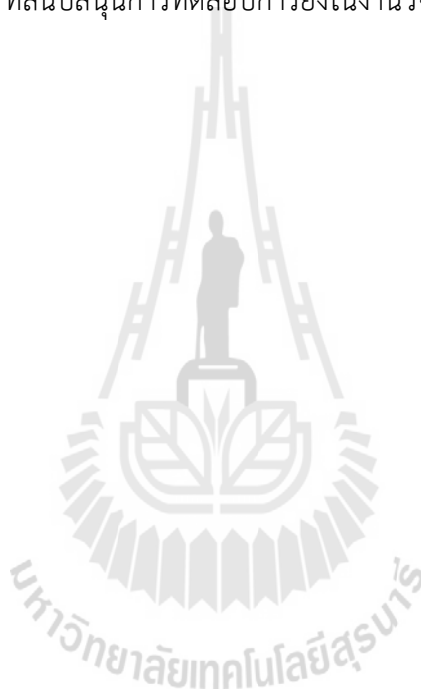
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2553

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จจลุล่วงด้วยดีโดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552 ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสุรพงษ์ เพชรวัตร ผู้ช่วยวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆจนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จจลุล่วงได้ด้วยดี และ พลอากาศตรีวีระศักดิ์ สิตานนท์ ผู้อำนวยการสำนักงานวิจัย ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ และเรืออากาศโทอนุชา ผลิเกะ นายทหารคนสนิท รองผู้อำนวยการสำนักงานวิจัยศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ ที่สนับสนุนการทดสอบการยิงในงานวิจัย จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จจลุล่วงได้ด้วยดี

(ผศ.ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล)  
ผู้วิจัย



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบให้เหมาะสม สำหรับการใช้งานเป็นเกราะกันกระสุน การทดลองส่วนแรก ทำการศึกษาผลของเซอร์โคเนียที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอะลูมินา-โครเมียมเซรามิก และหาปริมาณของสารเติมแต่งและอุณหภูมิในการเผาผนึกที่เหมาะสม โดยนำผงอะลูมินามาผสมกับโครเมียมปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และใช้เซอร์โคเนียปริมาณร้อยละ 0-6 โดยน้ำหนัก เป็นสารเติมแต่ง ส่วนผสมจะถูกอัดแห้งและทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่ต่าง ๆ วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึก จะนำไปวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะ ได้แก่ ความหนาแน่น รูปพรุน วัฏภาค โครงสร้างจุลภาค รวมถึง ความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว และความต้านทานการเจาะทะลุ การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของความหนาที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุ จากวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดจากการทดลองส่วนแรก

ผลการทดสอบเชิงกลพบว่าความทนต่อการดัดโค้ง มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $204 \pm 4.12$  MPa ซึ่งได้จากชิ้นงานที่ใช้สารเติมแต่งเซอร์โคเนียร้อยละ 6 โดยน้ำหนักที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1700^{\circ}\text{C}$  ค่าความเหนียว มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $6.35 \pm 0.34$  MPa.m<sup>0.5</sup> ซึ่งได้จากชิ้นงานที่ใช้สารเติมแต่งเซอร์โคเนียร้อยละ 6 โดยน้ำหนักที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1750^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่การลดความหนาของวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้ความต้านทานการเจาะทะลุลดลง



## Abstract

The purpose of this work is to improve the mechanical properties of composite materials for the armor application. The first part of the experiment is to study the effect of  $ZrO_2$  on mechanical properties of  $Al_2O_3 - Cr_2O_3$  based composite and to determine the proper amount of additive and sintering temperature.  $Al_2O_3$  powder was mixed with 3%wt  $Cr_2O_3$  and 0-6%wt  $ZrO_2$  as an additive. The mixtures were dry pressed and then sintered at different temperatures. Density, porosity, phase and microstructure of sintered composites were characterized. Flexural strength, hardness, fracture toughness and ballistic performance were also investigated. The second part of the experiment is to study the effect of thickness on ballistic resistance based on composite with the best mechanical properties from the first part.

The results from mechanical tests showed that the highest flexural strength,  $204 \pm 4.12$  MPa, was obtained with 6%wt  $ZrO_2$  addition and sintering temperature at  $1700^\circ C$ . The maximum fracture toughness,  $6.35 \pm 0.34$  MPa.m<sup>0.5</sup>, was obtained with 6%wt  $ZrO_2$  addition and sintering temperature at  $1750^\circ C$ . Whereas the ballistic resistance of composite decreased with decreasing composite thickness.



# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 อะลูมินา	5
2.2 โครเมีย	6
2.3 เซอร์โคเนีย	7
2.4 รูปแบบเสถียรของเซอร์โคเนีย	8
2.4.1 Partially stabilised zirconia	9
2.4.2 Tetragonal Zirconia Polycrystals (TZP)	10
2.4.3 Partially stabilised zirconia in a non zirconia matrix	11
2.5 กระบวนการเกิดความเหนียวของเซอร์โคเนีย	11
2.5.1 กระบวนการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาค ของเซอร์โคเนีย	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	18
3.2 วัสดุและสารเคมี	19
3.2.1 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide Powder)	19
3.2.2 ผงโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide Powder)	19
3.2.3 ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide Powder)	19
3.3 วิธีการทดลอง	30
3.3.1 การทดลองเบื้องต้น	21
3.3.1.1 การ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมล อิทธิยมออกไซด์ (4Y)	21
3.3.1.2 การเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมล อิทธิยมออกไซด์ (4Y)	22
3.3.2 การทดลองในงานวิจัย	23
3.3.3 การออกแบบการทดลอง	26
3.3.4 การทดสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น	27
3.3.4.1 การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของตัวอย่าง	27
3.3.4.2 การตรวจวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเฟส	28
3.3.5 การเตรียมแผ่นตัวอย่าง	29
3.3.6 การเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง	30
3.3.7 การทดสอบความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของตัวอย่าง	31
3.3.8 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง	31
3.3.9 การทดสอบความแข็งจุลภาค	33
3.3.10 การหาค่าความเหนียว	34
3.3.11 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ	35
3.3.12 การหาค่าความเปราะ	37
3.3.13 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>4 ผลการทดลอง และ อภิปรายผล</b>	40
4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น	40
4.1.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงอะลูมินา	40
4.1.1.1 การวิเคราะห์ทางวิภาคของผงอะลูมินา	41
4.1.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา	42
4.1.1.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงอะลูมินา	43
4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงโครเมีย	44
4.1.2.1 การวิเคราะห์ทางวิภาคของผงโครเมีย	45
4.1.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงโครเมีย	46
4.1.2.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงโครเมีย	47
4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย	48
4.1.3.1 การวิเคราะห์ทางวิภาคของผงเซอร์โคเนีย	49
4.1.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงเซอร์โคเนีย	50
4.1.3.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนีย	51
4.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)	52
4.1.4.1 การวิเคราะห์ทางวิภาคของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)	52
4.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะ และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-โครเมีย/เซอร์โคเนีย หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลา 90 นาที	53
4.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความหนาแน่น และปริมาตรรูพรุน	53
4.2.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการเปลี่ยนแปลงวิภาค	56



## สารบัญ (ต่อ)

	หนา
4.2.3 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อขนาดเกรน	61
4.2.4 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาค	63
4.2.5 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการตัดโค้ง ความเหนียว ความแข็งและความเปราะ	67
4.2.6 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความต้านทานการเจาะทะลุ	72
4.3 ผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มี ต่อความต้านทานการเจาะทะลุ	73
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หนา
2.1 แสดงผลสรุปสมบัติทางกลที่ได้จากการศึกษาระบบ $Al_2O_3$ - $Cr_2O_3$ ของงานวิจัยต่างๆ	15
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	19
3.3 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น	20
3.4 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น สารแต่งเติม และอุณหภูมิในการเผาผนึกของการทดลองที่1	26
4.1 แสดงลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา	40
4.2 แสดงลักษณะเฉพาะของผงโครเมีย	44
4.3 แสดงลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย	48
4.4 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของวัสดุเชิงประกอบแต่ละตัวอย่าง	53
4.5 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งสมบัติที่มีต่อขนาดเกรนของวัสดุเชิงประกอบแต่ละตัวอย่าง	61
4.6 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้ง ความเหนียว ความแข็ง และความเปราะของวัสดุเชิงประกอบของแต่ละตัวอย่าง ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 90 นาที	67
4.7 แสดงค่าความต้านทานการเจาะทะลุและระยะโพงหลัง (BFS) ของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันเป็นเวลา 90 นาที	72
4.8 แสดงผลของความหนาที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุและระยะโพงหลัง (BFS) ของตัวอย่างสูตรAC6Z1700	74

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงโครงสร้างของอะลูมินา	5
2.2	แสดงการเปลี่ยนวิวัฒนาการของเซอร์โคเนีย ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	7
2.3	แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาค ของ เซอร์โคเนีย ทั้ง 3 ระบบ	8
2.4	แสดงแผนภูมิวิวัฒนาการของ MgO ใน ZrO <sub>2</sub>	9
2.5	แสดงแผนภูมิวิวัฒนาการของ Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ใน ZrO <sub>2</sub>	10
2.6	แสดงผลของปริมาณ สารสร้างความเสถียร กับขนาด Critical Grain Size	11
2.7	แสดงการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวิวัฒนาการ	12
2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	13
2.9	แสดงค่าความแข็งแรงและค่าความเหนียวของ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่ %mol ของ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่แตกต่างกัน	14
2.10	แสดงค่าการปรับปรุงสมบัติความเหนียวและค่าความแข็งแรงของแต่ละตัวอย่างโดยใช้เซอร์โคเนีย	16
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมล อิตเทียมออกไซด์ (4Y)	21
3.2	กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่างการเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมล อิตเทียมออกไซด์ (4Y)	22
3.3	แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตามการทดลองที่ 1	23
3.4	แสดงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ	24
3.5	แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตามการทดลองที่ 2	25
3.6	แสดงเครื่อง Particle Size Analyzer	27
3.7	แสดงเครื่อง X-ray Diffraction, XRD	28
3.8	แสดงเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกแรงอัดขนาด 200 ตัน	29
3.9	กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หนา	
3.10	แสดงการเรียงลำดับในการขีดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด	33
3.11	แสดงลักษณะรอยกดและความยาวรอยแตกของชิ้นงาน	35
3.12	แสดงตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ	36
3.13	แสดงวิธีการวัดค่า BFS โดยวิธี Modeling clay	37
3.14	แสดงเครื่อง Ion Sputtering Device	38
3.15	แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
3.16	แสดงการวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เร็ด	39
4.1	แสดง XRD แพทเทิร์น ของผงอะลูมินา	41
4.2	แสดงรูปไมโครกราฟของผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	42
4.3	แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา	43
4.4	แสดง XRD แพทเทิร์น ของผงโครเมียม	45
4.5	แสดงรูปไมโครกราฟของผงโครเมียมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	46
4.6	แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของโครเมียม	47
4.7	แสดง XRD แพทเทิร์น ของผงเซอร์โคเนีย	49
4.8	แสดงรูปไมโครกราฟของผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	50
4.9	แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของเซอร์โคเนีย	51
4.10	แสดง XRD แพทเทิร์น ของผง 4Y เซอร์โคเนีย	52
4.11	แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	54
4.12	แสดงปริมาณรูพรุนของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	54
4.13	แสดงแผนภูมิวิภาคระหว่างอะลูมินาและโครเมียมออกไซด์	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หนา
4.14 แสดง XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650°C	56
4.15 แสดง XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1700°C	57
4.16 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C	58
4.17 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Y เซอร์โคเนียร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	59
4.18 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Y เซอร์โคเนียร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	60
4.19 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Y เซอร์โคเนียร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	60
4.20 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	62
4.21 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650°C	63
4.22 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1700°C	64
4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C	65
4.24 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ	68
4.25 แสดงค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	69
4.26 แสดงค่าความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	70
4.27 แสดงค่าความเปราะของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	71
4.28 แสดงค่า BFS ของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	73
4.29 แสดงค่า BFS ของตัวอย่างสูตร AC6Z1700 ที่มีความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่แตกต่างกัน	74

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1. ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสถานการณ์ของโลกได้เปลี่ยนแปลงไป ภัยพิบัติที่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่มนุษย์ที่ทุกประเทศทั่วโลกก็ล้วนแล้วแต่ให้ความสำคัญ นอกจากภัยทางธรรมชาติแล้วยังมีภัยที่ร้ายแรงที่ไม่ควรมองข้ามอีกอย่างหนึ่ง นั่นก็คือภัยจากการก่อการร้าย ซึ่งเกิดขึ้นจากน้ำมือของมนุษย์ด้วยกันเอง ไม่เว้นแต่ในประเทศไทย ภัยการก่อการร้ายหรือเหตุการณ์ความไม่สงบที่เกิดขึ้นนั้นได้ทำให้เกิดความเสียหายแก่ประเทศมากมาย ยกตัวอย่างเช่น การสูญเสียความเชื่อมั่นทางด้านเศรษฐกิจระหว่างประเทศ หรือจะเป็นการสูญเสียงบประมาณแผ่นดินที่ต้องนำมาใช้ในการปราบปรามการก่อการร้ายโดยใช้เหตุ และที่สำคัญที่สุดก็คือการที่ประเทศนั้นต้องสูญเสียทรัพยากรมนุษย์ ซึ่งเป็นทรัพยากรพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการพัฒนาประเทศ การวิจัยและพัฒนาวัสดุก็ถือเป็นศาสตร์อย่างหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาวัสดุหรืออุปกรณ์ที่มีศักยภาพสามารถป้องกันการทำลายล้างหรือการโจมตีจากฝ่ายตรงข้ามได้ อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากกระสุน หรือ เกราะกันกระสุน ก็ถือได้ว่าเป็นหนึ่งในหลาย ๆ อุปกรณ์ที่มีบทบาทหน้าที่สำคัญเกี่ยวกับการป้องกันการทำลาย ที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นบุคคล ยานพาหนะ ฐานทัพ รวมถึงสิ่งของต่าง ๆ เป็นต้น

เกราะกันกระสุน คือชิ้นงานที่ทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการต่อต้าน พลังงานและแรงปะทะของกระสุนปืนไม่ให้ผ่านทะลุเกราะได้ เมื่อหัวกระสุนวิ่งกระทบจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกระสุนกับวัสดุเกราะ ถ้าวัสดุเกราะสามารถถ่ายเทพลังงานจากหัวกระสุน ทำให้กระสุนหมดพลังงานลง กระสุนก็จะไม่สามารถผ่านทะลุเป้าได้ ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุหลายชนิดนำมาผลิตเป็นเกราะกันกระสุน ยกตัวอย่างเช่น

- วัสดุประเภทโลหะ เป็นเกราะที่ทำมาจากแผ่นโลหะ อาจจะใช้โลหะชนิดเดียว หรือหลายชนิดผสมเข้าด้วยกัน สามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่มีน้ำหนักมาก

- วัสดุประเภทเส้นใยพอลิเมอร์ เป็นเกราะอ่อน น้ำหนักเบา ทำจากเส้นใยซึ่งนำมาถักทอแล้วอัดประกบเข้าด้วยกันหลายชั้น สามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่ไม่สามารถรับแรงกระแทกและกระสุนที่หมุนด้วยความเร็วสูงได้ ไม่ทนต่อความชื้นทำให้คุณภาพเส้นใยด้อยลงไป

-วัสดุประเภทวัสดุสังเคราะห์ จัดเป็นเกราะวัสดุสังเคราะห์ประเภทหนึ่งที่น่าวัสดุหลายชนิดมาประกอบเข้าด้วยกัน สามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่ไม่ทนต่อความร้อน

-วัสดุประเภทเซรามิก เป็นเกราะที่ทำจากเซรามิก สามารถลดความรุนแรงของหัวกระสุนได้ เป็นอย่างดีเนื่องจากเซรามิกมีความแข็งสูง สามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่เกราะเซรามิกมักแตกร้าวได้ง่าย

วัสดุประเภทเซรามิกที่นิยมนำมาใช้ประกอบเป็นแผ่นเกราะป้องกันกระสุน ได้แก่ อะลูมินา เซรามิก เนื่องจากอะลูมินามีความแข็งสูง และคงความแข็งแรงได้ที่อุณหภูมิสูง ทนต่อความร้อน ทนต่อสารเคมีและสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโลหะและวัสดุจำพวกพลาสติก รวมถึงยังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเซรามิกประเภทอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม อะลูมินาเองก็มีข้อจำกัดในการนำมาใช้งานเป็นเกราะกันกระสุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านความเหนียว แตกร้าวได้ง่าย ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้พยายามปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาโดยใช้สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ผสมกับอะลูมินาเพื่อขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ และได้มีการนำโครเมียม ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) เข้ามาปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินา โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความแข็งและความแข็งแรง

วัสดุเซรามิกในระบบอะลูมินา-โครเมียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ) เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นเครื่องมือตัดแต่งวัสดุ (Cutting Tools) รวมถึงใช้เป็นแผ่นเกราะป้องกันกระสุน และมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้มีการทำการศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาโดยใช้โครเมียม แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวัสดุเซรามิกในระบบอะลูมินา-โครเมียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ) นั้น พบว่าการเติมโครเมียม ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) ลงไปสามารถที่จะทำให้ได้วัสดุเซรามิกมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความเหนียว แต่ก็เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานทำเป็นเกราะกันกระสุน ซึ่งต้องการวัสดุที่มีความเหนียวสูงสามารถรับแรงกระแทกจากกระสุนได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเซอร์โคเนีย ( $\text{ZrO}_2$ ) มาใช้เป็นสารเติมแต่งสมบัติทางกลให้แก่ อะลูมินา-โครเมียมเซรามิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านความเหนียว เนื่องจากเซอร์โคเนีย นั้นมีสมบัติด้านความเหนียวที่เด่นกว่าเซรามิกชนิดอื่น ๆ

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมียม ที่มีอนุภาคเซอร์โคเนียเป็นวัสดุเสริมแรง
- 2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง ความเหนียว และความแข็งแรง ระหว่างวัสดุอะลูมินา-โครเมียม และวัสดุอะลูมินา-โครเมียมที่มีอนุภาคเซอร์โคเนียเป็นวัสดุเสริมแรง
- 2.3 เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น วัฏภาค
- 2.4 เพื่อศึกษาปริมาณของอนุภาคเซอร์โคเนียและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาพูนึก ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี

## 3. สมมติฐานการวิจัย

- 3.1 เมื่อเติมเซอร์คอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการเผาพูนึกของวัสดุเชิงประกอบจะดีขึ้น รวมทั้งค่าความแข็งแรง ความเหนียว และความสามารถทนต่อการแตกหักเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน ของวัสดุเชิงประกอบจะดีขึ้น
- 3.2 ปริมาณของเตตระโกนอลเซอร์โคเนีย ( $t\text{-ZrO}_2$ ) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่ง  $\text{CeO}_2$  ในวัสดุเชิงประกอบ
- 3.3 ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารเติมแต่ง  $\text{Cr}_2\text{O}_3$
- 3.4 เมื่อเผาพูนึกวัสดุเชิงประกอบด้วยรูปแบบการเผาที่เหมาะสม จะทำให้สมบัติเชิงกลซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความแข็งแรง และความเหนียว ของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น

## 4. ขอบเขตของการวิจัย

- 4.1 ศึกษาผลของการผสมอนุภาคเซอร์โคเนีย 0-6 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่มีต่อลักษณะเฉพาะ และ สมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมียม
- 4.2 ศึกษาอุณหภูมิการเผาพูนึกที่เหมาะสมกับวัสดุอะลูมินา-โครเมียม-เซอร์โคเนีย
- 4.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างวัสดุอะลูมินา-โครเมียมที่ไม่ได้ผสมอนุภาคเซอร์โคเนีย กับวัสดุอะลูมินา-โครเมียมที่ผสมอนุภาคเซอร์โคเนีย



## 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

5.1 ทำให้ทราบประโยชน์และศักยภาพของการใช้อุณหภูมิเซอร์โคเนียผสมในวัสดุอะลูมินา-โครเมีย ที่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมียได้

5.2 ทำให้ทราบผลของลักษณะเฉพาะ และสมบัติเชิงกลต่างๆของวัสดุอะลูมินา-โครเมีย ที่มีปริมาณส่วนผสมของอนุภาคเซอร์โคเนียที่แตกต่างกัน

5.3 ทำให้ทราบปริมาณของอนุภาคเซอร์โคเนีย และ อุณหภูมิในการเผาผนึกที่เหมาะสม เพื่อทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ยืดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

### หน่วยงานที่น่าสามารถผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

อุตสาหกรรมต่างๆภายในประเทศที่มีใช้ หรือทำการผลิตชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์เซรามิก ได้แก่

- อุตสาหกรรมเซรามิก เช่น วัสดุทนไฟในเตาเผาและเตาหลอม วัสดุขัดถู เครื่องมือตัดแต่ง วัสดุ ลูกบด และผนังกรูหม้ออบวัตุดิบ
- อุตสาหกรรมทหาร เช่น อุปกรณ์ลดอันตรายจากกระสุนปืน
- อุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของรถยนต์

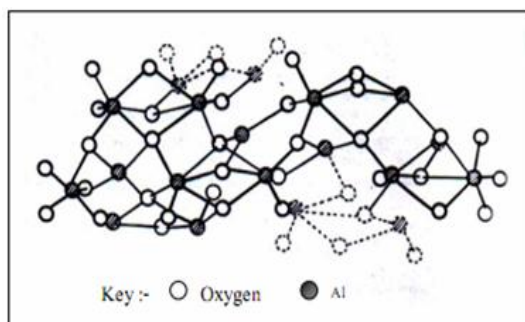


## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อะลูมินา

อะลูมินา (Alumina) มีชื่อทางเคมีคือ Aluminium Oxide มีสูตรทางเคมี เป็น  $Al_2O_3$  จัดเป็น ออกไซด์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ยุคค้ำบรรพจนกระทั่งถึงปัจจุบันและยังคงถูกพัฒนานำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคต อะลูมินาบริสุทธิ์มีความถ่วงจำเพาะ 3.69 จุดหลอมเหลว  $2030^{\circ}C$  ความแข็ง (Mohs Scale) เท่ากับ 9 อะลูมินาในธรรมชาติจัดเป็นแร่ธาตุที่พบในรูปของ Corundum ( $Al_2O_3$ ) Diaspore ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) Gibbsite ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ) และ Bauxite ( $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ ) โดยแร่ Corundum ที่พบจะเป็นรัตนชาติ เช่น ทับทิม (Ruby) ไพลิน (Sapphire) บุษราคัม (Yellow Sapphire) เป็นรูปแบบของ Corundum ที่มีมลทิน ในขณะที่ Corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี อะลูมินาบริสุทธิ์และ Hydrate อะลูมินา สามารถสกัดได้จาก แร่ Bauxite และดินลูกรังโดยวิธีของ Bayer (Bayer Process) ก็นำแร่มาบดแล้วหลอมด้วย โซดาไฟ (Caustic Soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผาอะลูมินาจะพบในรูปอัลฟา ( $\alpha$ ) แกมมา ( $\gamma$ ) และเบต้า ( $\beta$ ) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ อัลฟาอะลูมินาและแกมมา อะลูมินาในอุณหภูมิที่ไม่เกิน  $500^{\circ}C$  อะลูมินาจะอยู่ในรูปแกมมา หากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง  $1150-1200^{\circ}C$  จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของอัลฟา แต่เบต้าอะลูมินาจะอยู่ในรูปของ สารประกอบโซเดียมคือ Sodium Aluminate ( $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$ ) (สุจินต์ พราวพันธุ์, 2545) ซึ่งอะลูมินาที่มีความเสถียรมากที่สุดอยู่ในรูปอัลฟาอะลูมินา ( $\alpha-Al_2O_3$ ) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเฮกซาโกนอล (Hexagonal) โดยมีออกซิเจนเรียงตัวกันแบบเฮกซาโกนอล และมี อะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่ในช่องออกตะสี่ดรอ 2 ใน 3 ส่วนของช่องทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



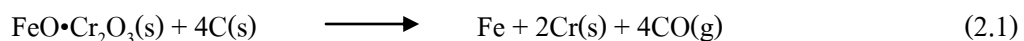
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของอะลูมินา (W.E. Worrall, 1986)

เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีค่าความแข็งสูง มีความหนาแน่นสูง มีความต้านทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนสูง ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (Abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมเซรามิก และอื่น ๆ ซึ่งแนวโน้มในการนำอะลูมินาไปใช้งานก็ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิกสมัยใหม่ สามารถนำอะลูมินาที่ได้จากการสังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภท เช่น อุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า เครื่องมือตัดแต่งอุปกรณ์ทางการแพทย์ อวัยวะเทียม เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้น โดยอะลูมินาที่นำมาใช้นั้นจะมีชนิดทั้งที่เป็นผง เป็นผลึกเดี่ยว ๆ เป็นฟิล์มบาง ๆ เป็นเส้นใยและที่เป็นรูพรุน ทั้งนี้อะลูมินาที่จะนำมาใช้นั้นต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีความละเอียดมากเพราะสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของอะลูมินาสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการกำจัดมลทินต่าง ๆ ออกไป เช่น ซิลิกาที่ปนเปื้อนจะมีผลต่อการควบคุม Microstructure มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนของอะลูมินารวมทั้งมีผลต่อการเผาผนึก (Sintering) และแคลเซียมที่ปนเปื้อนก็มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมินาลดลง

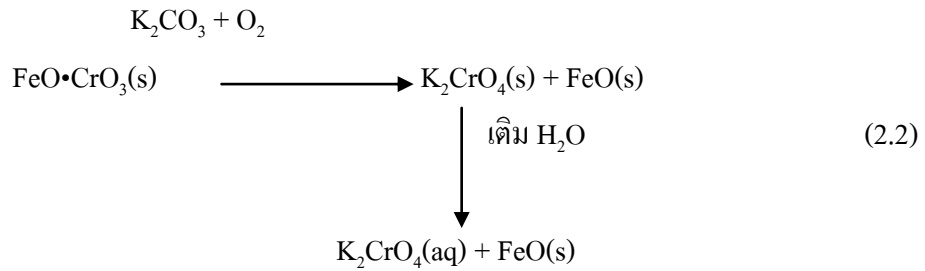
## 2.2 โครเมียม

โครเมียม หรือโครเมียมออกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซาโกนอล (Hexagonal) มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง ประมาณ  $5.22 \text{ g/cm}^3$  จุดหลอมเหลวประมาณ  $2330^\circ\text{C}$  โครเมียมนี้เกิดจากแร่โครไมต์ซึ่งมีสูตรเคมีว่า  $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$  โดยในเนื้อสินแร่จะพบเหล็กออกไซด์ ( $\text{FeO}$ ) อยู่ประมาณ 32% และโครเมียม ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) อยู่ประมาณ 68% มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเล็กน้อย ส่วนมากที่พบจะมีสีดำ สีเทา หรือสีดำน้ำตาล

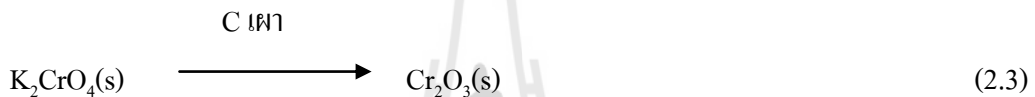
ซึ่งการสังเคราะห์โครเมียมนี้สามารถทำได้โดยเริ่มจากการเผาแร่โครไมต์กับคาร์บอน



Fe และ Cr ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปโลหะเจือ โดยมี Fe : Cr = 1 : 2 ถ้าต้องการโครเมียมบริสุทธิ์สามารถเตรียมได้โดยเผาแร่โครไมต์กับ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ในอากาศจะได้  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  ซึ่งละลายน้ำได้จึงสามารถแยกออกจาก FeO ได้

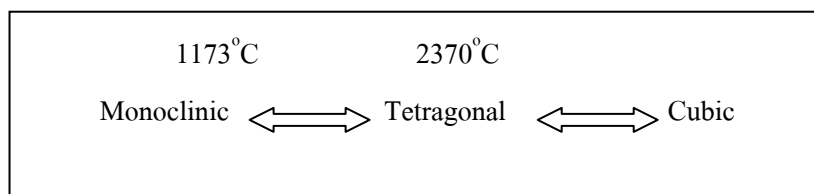


กรอง  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  ออกจาก  $\text{FeO}$  ระเหยน้ำออกจะได้  $\text{K}_2\text{CrO}_4(\text{s})$  จากนั้นนำมาเผาถ่านคาร์บอน (C) จะได้  $\text{Cr}_2\text{O}_3$



### 2.3 เซอร์โคเนีย

เซอร์โคเนียที่เกิดตามธรรมชาติโดยทั่วไปจะพบอยู่ในรูปของแร่แบดเดิลไต์ (Baddeleyite) หรือเซอร์คอน ( $\text{ZrSiO}_4$ ) ซึ่งการที่จะได้เซอร์โคเนียที่บริสุทธิ์นั้น จะต้องทำการแยกสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตที่ซับซ้อนและทันสมัย เซอร์โคเนียบริสุทธิ์ที่ได้จะอยู่ในวิภาคแบบโมโนคลินิค (Monoclinic) ที่อุณหภูมิห้อง และจะเกิดการเปลี่ยนวิภาคเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal Phase) และลูกบาศก์ (Cubic Phase) เมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งผลของการเปลี่ยนโครงสร้างนี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูงถึง 3% - 5% ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เราไม่สามารถใช้ประโยชน์จากเซอร์โคเนียบริสุทธิ์ได้ (R. Stevens, 1986)



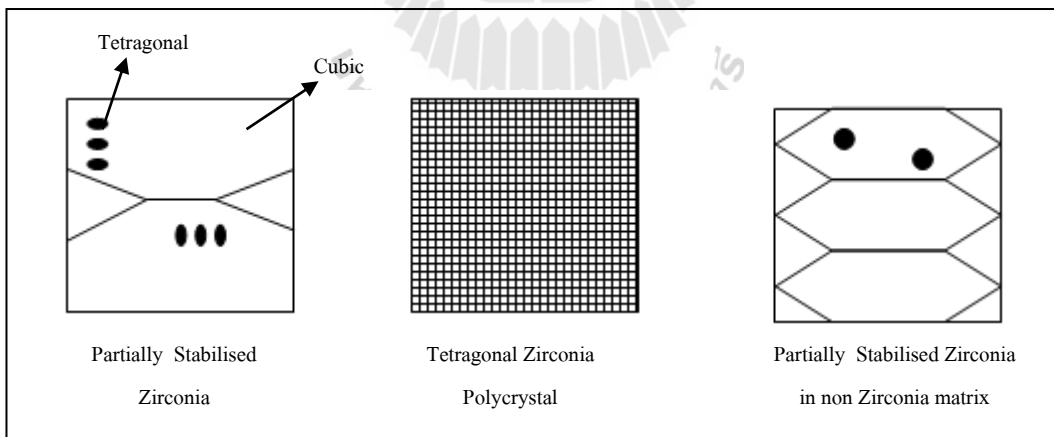
รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนวิภาคของเซอร์โคเนีย ณ อุณหภูมิต่าง ๆ (K.K. Chawla, 1993)

แต่ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณดังกล่าวนี้ก็เป็จุดเด่นพิเศษของเซอร์โคเนียที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยการเติมสารบางตัวที่เรียกว่าสารสร้างความเสถียร (Stabilizer) เมื่อเติมสารดังกล่าวแล้ว เซอร์โคเนียจะสามารถนำมาใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้และยังเกิดสมบัติพิเศษที่สำคัญประการหนึ่งคือ ความเหนียว

## 2.4 รูปแบบเสถียรของเซอร์โคเนีย

ดังได้กล่าวในเบื้องต้นแล้วว่า เซอร์โคเนียไม่สามารถนำมาใช้งานได้ตามลำพังที่อุณหภูมิห้องจำเป็นต้องเติมสารสร้างความเสถียรบางตัวเข้าไป โดยสารที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อิตเทียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยสารดังกล่าวนี้จะทำให้เซอร์โคเนียสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องโดยจะไปทำให้โครงสร้างของเซอร์โคเนียเสถียรในรูปเตตระโกนอลหรือลูกบาศก์ การเติมสารสร้างความเสถียรที่ต่างชนิดและปริมาณที่ต่างกันจะทำให้ได้ โครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะความต่างของโครงสร้างจุลภาค ได้เป็น 3 ลักษณะคือ

1. Partially Stabilised Zirconia
2. Tetragonal Zirconia Polycrystal
3. Partially Stabilised Zirconia in a non Zirconia matrix



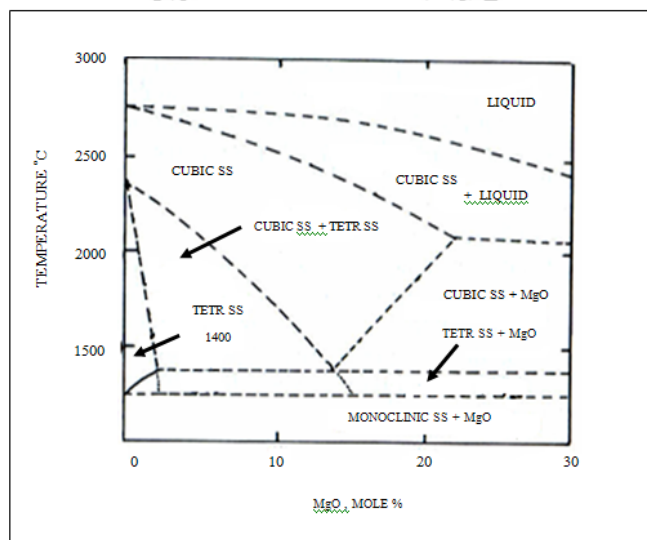
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเซอร์โคเนีย ทั้ง 3 ระบบ (Richard H.J. Hannink, Patrick M. Kelly, and Barry C. Muddle, 2000)

ซึ่งจากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันจึงทำให้เกิดชื่อเรียกและสัญลักษณ์ของเซอร์โคเนียแตกต่างกันออกไปเช่น

- TZP Tetragonal Zirconia Polycrystal
- PSZ Partially Stabilised Zirconia
- FSZ Fully Stabilised Zirconia
- TTC Transformation Toughened Ceramics
- ZTA Zirconia Toughened Alumina
- TTZ Transformation Toughened Zirconia

#### 2.4.1 Partially Stabilised Zirconia

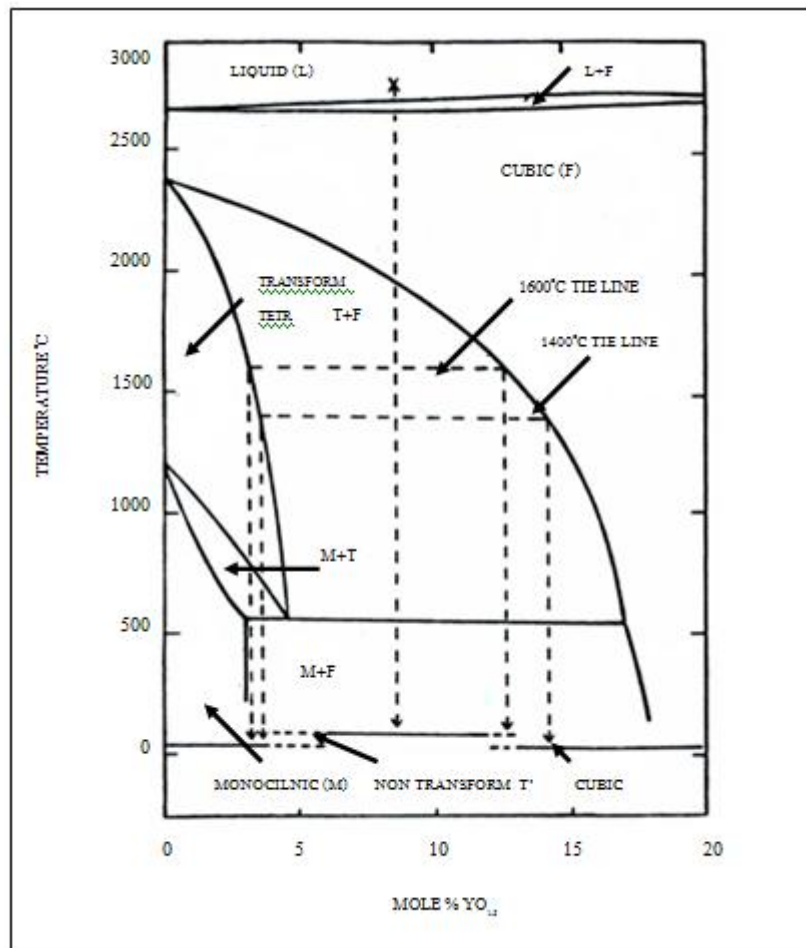
คือ ลักษณะของเซอร์โคเนียที่บางส่วนเสถียร (Stable) ในวัฏภาคเตตระโกนอลแล้วกระจายอยู่ในวัฏภาคลูกบาศก์ โดยทั่วไปการทำให้เกิดโครงสร้างลักษณะนี้จะใช้ MgO และ CaO เป็นสารสร้างความเสถียร โดยหากพิจารณาจากแผนภูมิวัฏภาคในรูปที่ 2.4 ในระบบของ  $ZrO_2$  และ MgO เมื่อเราพิจารณาปริมาณของ MgO ในช่วง 6%mol - 8%mol จะพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ  $2000^{\circ}C-2450^{\circ}C$  เกิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ในวัฏภาคลูกบาศก์ หากทำให้สารละลายของแข็งนี้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) มาอยู่ในบริเวณที่เกิดสารละลายของแข็ง วัฏภาคลูกบาศก์ และวัฏภาคเตตระโกนอลในบริเวณนี้ จะเกิดนิวเคลียสของสารละลายของแข็งวัฏภาคเตตระโกนอล ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของนิวเคลียสได้ โดยการคุมอัตราการลดอุณหภูมิ (Cooling Rate) จากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมาที่อุณหภูมิห้องจากกระบวนการดังกล่าวจะได้ PSZ ซึ่งผลึกของ  $t-ZrO_2$  นี้จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็นโมโนคลีนิกเซอร์โคเนีย ( $m-ZrO_2$ ) ได้เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งเป็นกระบวนการการเกิดความเหนียวที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิวัฏภาคของ MgO ใน  $ZrO_2$  (Grain C.F., 1967)

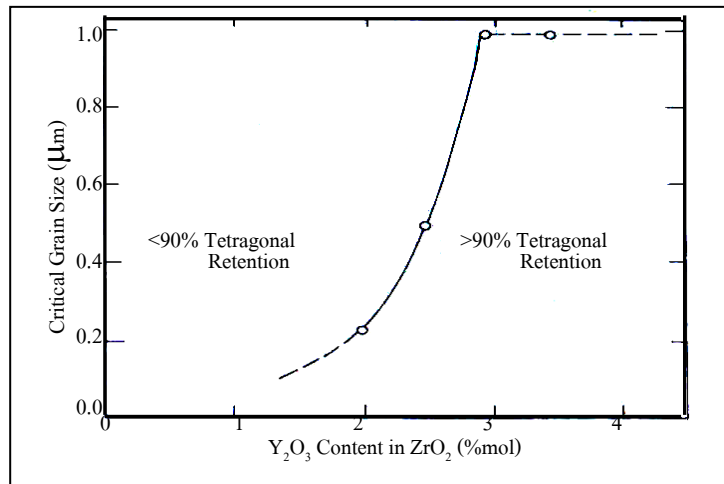
#### 2.4.2 Tetragonal Zirconia Polycrystal (TZP)

คือ เซอร์โคเนียที่เสถียรอยู่ในวัฏภาคเตตระโกนอลทั้งหมด โดยทั่วไปจะเกิดจากการใช้  $Y_2O_3$  เป็นสารสร้างความเสถียร หากพิจารณาแผนภูมิวัฏภาคในระบบ  $ZrO_2-Y_2O_3$  (รูปที่ 2.5) บริเวณ 0%mol - 5%mol ของ  $Y_2O_3$  จะพบว่าในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1300°C ถึง 1650°C เซอร์โคเนียจะอยู่ในวัฏภาคเตตระโกนอลเกือบ 100% ซึ่งหากทำให้เซอร์โคเนียที่อยู่ในสภาพดังกล่าวเย็นตัวอย่างรวดเร็วมาที่อุณหภูมิห้อง จะได้เซอร์โคเนียที่อยู่ในรูปของ TZP จากการศึกษาสมบัติระหว่างความแข็งแรงกับขนาดอนุภาคของ TZP พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่เกินกว่าขนาดวิกฤต (Critical Size) (แสดงในรูปที่ 2.6) โครงสร้างเตตระโกนอล จะสามารถเปลี่ยนวัฏภาคได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งผลของการเปลี่ยนวัฏภาคนี้ จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุลดลง (R. Stevens, 1986)



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภูมิวัฏภาคของ  $Y_2O_3$  ใน  $ZrO_2$  (Miller R.A., Smialek R.G., and Garlick, 1981)

จากที่กล่าวเบื้องต้นว่าขนาดของเกรน (Grain Size) ของ TZP มีผลต่อค่าความแข็งแรงดังนั้นจึงมีการศึกษาหาขนาดวิกฤตที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนียพบว่า ขนาดวิกฤตขึ้นอยู่กับปริมาณของสารสร้างความเสถียรที่เติมลงไป ดังรูปที่ 2.6 (R. Stevens, 1986)



รูปที่ 2.6 แสดงผลของปริมาณสารสร้างความเสถียรกับขนาด Critical Grain Size (R. Stevens, 1986)

### 2.4.3 Partially Stabilised Zirconia in a non Zirconia matrix

คือ เซอร์โคเนียที่มีความละเอียดระดับไมครอนกระจายอยู่ในเนื้อหลัก (Matrix) อื่น ที่ไม่ใช่ เซอร์โคเนีย เช่น อะลูมินาหรือมุลไลต์ หากกระจายอยู่ในเนื้อหลักที่เป็นอะลูมินาโดยทั่วไป จะเรียกว่า Zirconia Toughened Alumina (ZTA) หรือหากเซอร์โคเนียถูกกระจายอยู่ในเนื้อหลักซึ่งเป็นมุลไลต์ก็จะถูกเรียกว่า Zirconia Toughened Mullite (ZTM)

## 2.5 กระบวนการเกิดความเหนียวของเซอร์โคเนีย

### 2.5.1 กระบวนการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนีย

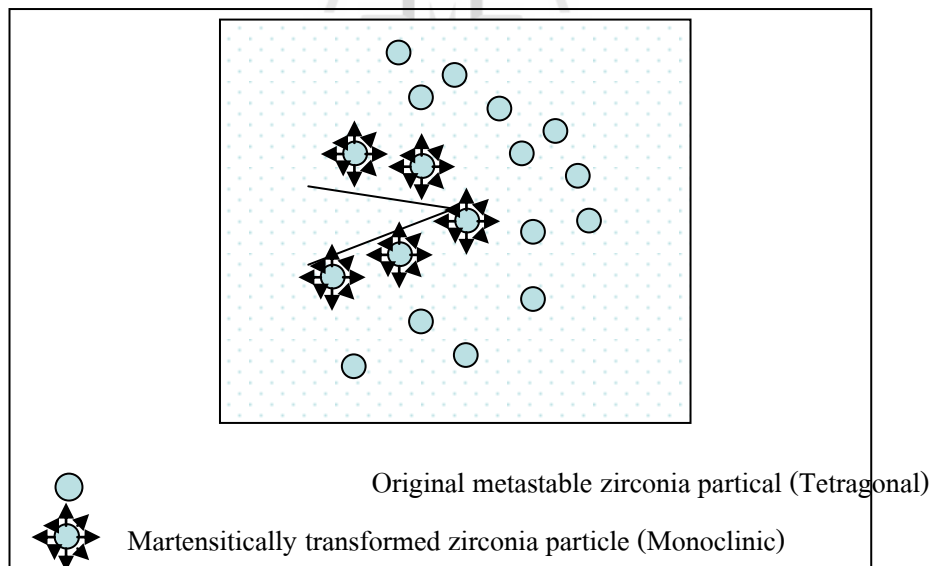
คือการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนียจาก  $t\text{-ZrO}_2$  เป็น  $m\text{-ZrO}_2$  โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการลดอุณหภูมิหลังจากการเผาผนึก เซอร์โคเนียจะเกิดการเปลี่ยน วัฏภาคจาก  $t\text{-ZrO}_2$  เป็น  $m\text{-ZrO}_2$  ที่อุณหภูมิประมาณ  $1200^\circ\text{C}$  อย่างไรก็ตาม เซอร์โคเนียที่มีขนาดอนุภาคเล็กหรือถูกบังคับโดยวัฏภาคหลัก (เช่น เซอร์โคเนียที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของอะลูมินา) เซอร์โคเนียเหล่านี้จะสามารถคงตัวอยู่ในสภาวะอุปเสถียรของ  $t\text{-ZrO}_2$  ได้ กระบวนการการเกิด ความเหนียวโดยการเปลี่ยนวัฏภาคนี้จะเริ่มขึ้นเมื่อ มีรอยร้าวเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน รอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลทำให้บริเวณที่มีรอยร้าวเกิดแรงเค้น ซึ่ง



พลังงานส่วนนี้จะทำให้เซอร์โคเนียที่อยู่ในสถานะอุปเสถียรของ  $t\text{-ZrO}_2$  เปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของ  $m\text{-ZrO}_2$  ซึ่งผลของการเปลี่ยนวัฏภาคนี้จะทำให้เซอร์โคเนียเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยจะขยายตัวประมาณ 3% ส่งผลให้เกิดแรงกดบริเวณปลายของรอยร้าว จึงทำให้รอยร้าวไม่สามารถวิ่งต่อไปได้

ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการเกิดความเหนียวนี้คือ ขนาดของอนุภาคเซอร์โคเนีย กล่าวคือ เซอร์โคเนียจะมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนวัฏภาคเนื่องจากแรงเค้นที่เกิดโดย รอยร้าวขนาดหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะเรียกขนาดนี้ว่าขนาดวิกฤต (Critical Size) ถ้าอนุภาคของเซอร์โคเนียมีขนาดเล็กไปกว่าขนาดวิกฤต เซอร์โคเนียจะไม่ยอมเปลี่ยนวัฏภาคเมื่อมีรอยร้าวขึ้นในชิ้นงาน แต่ถ้าเซอร์โคเนียมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินกว่าขนาดวิกฤต เซอร์โคเนียจะเปลี่ยนวัฏภาคเองโดยธรรมชาติ ซึ่งขนาดวิกฤตนี้จะถูกกำหนดโดย การบ่งคับของวัฏภาคหลัก และธรรมชาติของเซอร์โคเนียเอง (R. Stevens, 1986)

จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า ความเหนียวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของ  $t\text{-ZrO}_2$  หากชิ้นงานมี  $t\text{-ZrO}_2$  มากชิ้นงานก็มีแนวโน้มที่จะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (R.W. Cahn, P. Haasen, and E.J.Kramer, 1993 )



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาค (R. Stevens, 1986)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

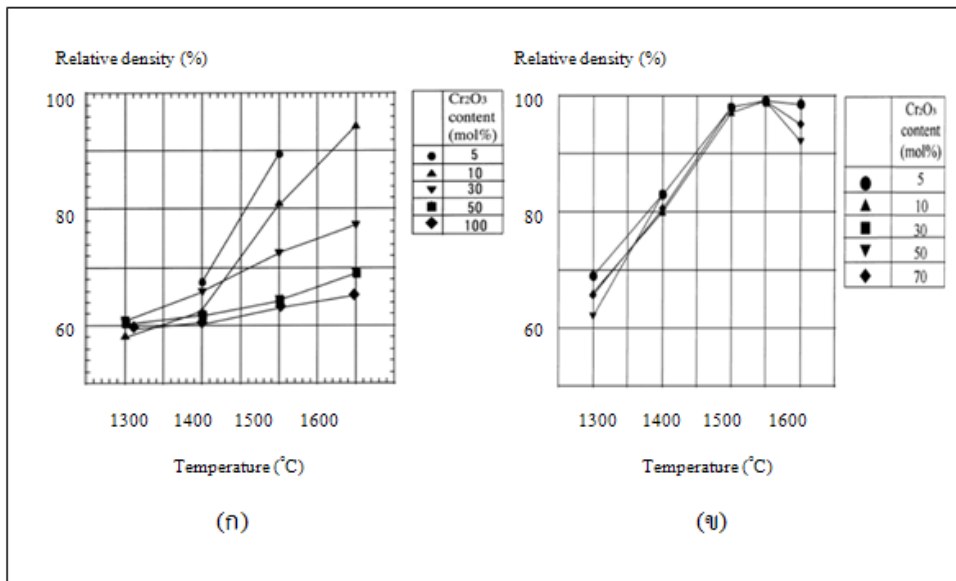
มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาด้วยการทำอะลูมินาเป็นวัสดุเชิงประกอบโดยการเติมสารเติมแต่งสมบัติเชิงกล (Additive)

อย่างที่ได้อธิบายไปแล้วว่า โครเมียมเป็นสารประกอบทางเซรามิกที่มีการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมหลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นเครื่องมือตัดแต่ง (Cutting Tools) รวมถึงใช้เป็นวัสดุขัดถู (Abrasive) และเป็นเสื่อเกราะกันกระสุน เป็นต้น และมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้มีการทำการศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาโดยใช้โครเมียม

Takehiko Hirata et al. (2000) ได้ศึกษาผลการ Sintering ของระบบ  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  ซึ่งทำการศึกษาโดยการเติม  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ใน %mol ที่แตกต่างกันคือ 5 10 30 และ 50%mol  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ลงไปใน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จากนั้นนำมาเผาผนึก ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 1300 1400 1500 และ 1600°C ตามลำดับ ในบรรยากาศปกติและสุญญากาศ ผลการทดลองที่ได้พบว่า การเผาผนึกในบรรยากาศปกติ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  จะเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซ  $\text{CrO}_3$  ระบายออกมาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.4)

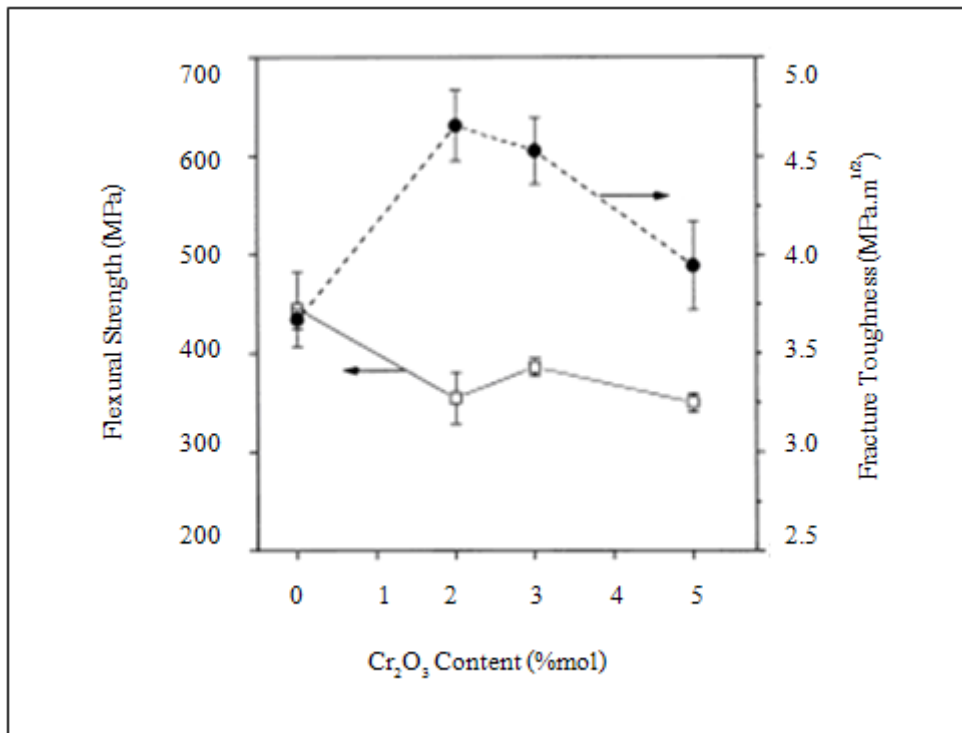


ซึ่งมีผลทำให้ Microstructure ที่ได้มีลักษณะหยาบ (Coarsening) และมีรูพรุนมาก และเมื่อทำการเผาผนึกในบรรยากาศสุญญากาศ Microstructure ที่ได้จะมีปริมาณรูพรุนลดลง ส่วนอุณหภูมิในการเผาผนึกที่สูงขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีการหดตัวลดลง ในขณะที่ปริมาณ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะต่ำและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึก



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของวัสดุ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เซรามิก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) บรรยากาศปกติ (ข) บรรยากาศสุญญากาศ (Takehiko Hirata et al., 2000)

Doh-Hyung Riu et al. (2000) ได้ศึกษาผลการเติม Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ลงไปใน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยการเติม Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ใน %mol ที่แตกต่างกันไปคือ 0 2 5 และ 10%mol จากนั้นนำแต่ละตัวอย่างไปทำการขึ้นรูปด้วยวิธี hot press ด้วยความดัน 40 MPa และเผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่า Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เติมเข้าไปนั้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ในขณะที่ค่าความแข็งและความเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเติม Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้สมบัติทางกลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ลดลง ซึ่งสาเหตุนี้เกิดจากความผิดปกติของเกรน ซึ่งเกรนโตและมีลักษณะรูปร่างเป็น Platelike เกิดจาก Cr ions ที่อยู่ผิวของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่อยู่ติดกับ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะมี Cr ions จำนวนมาก ส่งผลให้เกรนโตอย่างรวดเร็วและบริเวณ Boundary มีลักษณะ ไม่พอดีกัน (Misfit) โดย %mol Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ที่ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ 2%mol Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งเมื่อเติมเข้าไปแล้วจะมีความเหนียวประมาณ 4.7 MPa.m<sup>1/2</sup> และมีค่าความแข็งประมาณ 1738 Kg/mm<sup>2</sup>



รูปที่ 2.9 แสดงค่าความแข็งแรงและค่าความเหนียวของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ %mol ของ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่แตกต่างกัน (Doh-Hyung Riu et al., 2000)

K. Shibata et al. (1997) ได้ศึกษาผลของสมบัติทางกลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยการเติม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ใน %mol ที่แตกต่างกัน คือ 0 5 10 15 20 และ 25%mol จากนั้นนำแต่ละตัวอย่างไปทำการขึ้นรูปด้วยวิธี HIP ภายใต้อุณหภูมิ 196 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงและความเหนียวที่วัดได้ มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ประมาณ 23.4 GPa และ 4.0 MPa.m<sup>1/2</sup> ส่วนค่าความแข็งแรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ %mol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น โดยสูงสุดจะอยู่ที่ 25%mol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะมีค่าประมาณ 380 MPa ซึ่งเกิดจาก Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เติมเข้าไปจะมีผลทำให้ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีขนาดของเกรนลดลง จึงทำให้ความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของระบบอะลูมินา-โครเมีย (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) นั้น พบว่าการเติมโครเมีย (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ลงไปสามารถที่จะทำให้อะลูมินามีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นได้จริง (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) แต่ก็พบว่ายังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานทำเป็นเกราะกันกระสุน กล่าวคือ โครเมียที่เติมลงไปนั้นสามารถทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย

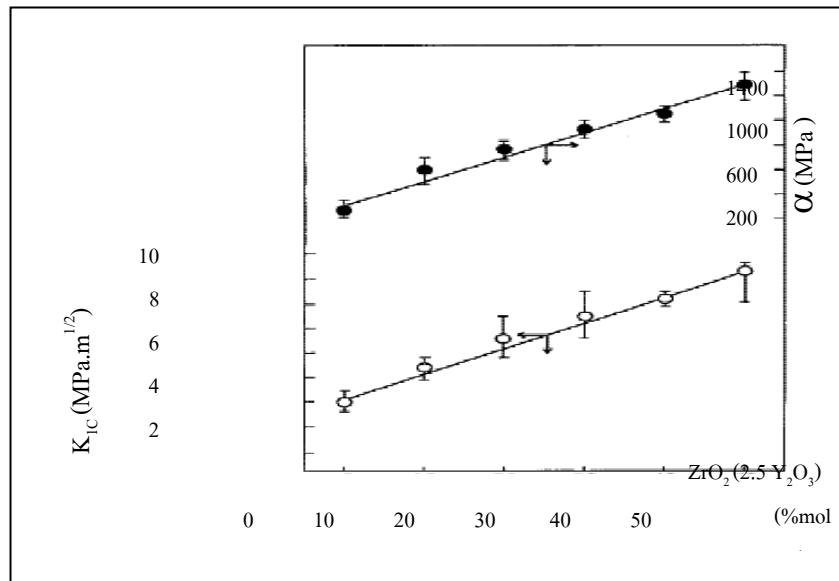
ตารางที่ 2.1 แสดงผลสรุปสมบัติทางกลที่ได้จากการศึกษาระบบ  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  ของงานวิจัยต่าง ๆ

ผลงานวิจัย	Materials	Composition (%mol)	Mechanical properties		
			$K_{IC}$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )	MOR (MPa)	Hv (GPa)
Doh-Hyung Riu	$\text{Al}_2\text{O}_3$	100	3.7	455	16.81
K. Shibata	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$	25/75	4.0	380	23.40
Doh-Hyung Riu	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$	98/2	4.7	355	17.38

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำ เซอร์โคเนีย ( $\text{ZrO}_2$ ) มาใช้เป็นสารเติมแต่งสมบัติด้านความเหนียวให้แก่ อะลูมินา-โครเมียมเซรามิก เนื่องจากเซอร์โคเนียมีสมบัติด้านความเหนียวที่เด่นกว่าเซรามิก ชนิดอื่น ๆ ดังจะเห็นได้จาก มีงานวิจัยจำนวนมากได้ใช้เซอร์โคเนียเป็นสารเติมแต่งสมบัติด้านความเหนียว

W. H Tuan et al. (2002) ได้ทำการศึกษารูปสมบัติทางกลของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยการเติม  $\text{ZrO}_2$  ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 5 7.5 10 12.5 และ 15%vol  $\text{ZrO}_2$  จากนั้นนำมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธี Pressureless Sintering ด้วยความดัน 44 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1600^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า  $\text{ZrO}_2$  ที่เติมเข้าไปสามารถที่จะปรับปรุง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น ได้โดยที่ %vol  $\text{ZrO}_2$  ที่ให้ค่าสูงที่สุดจะอยู่ที่ 12.5%vol  $\text{ZrO}_2$  คือเมื่อเติมเข้าไปแล้วจะมีค่าความแข็งแรงประมาณ 575 MPa และมีค่าความเหนียวประมาณ  $5.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

Yoshihiko Takano et al. (1998) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของ  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2(2.5\text{Y}_2\text{O}_3)$  โดยการเติม  $\text{ZrO}_2$  ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 9.75(0.25 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) 19.5(0.5 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) 29.25(0.75 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) 39.0(1.0 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) และ 48.75(1.25 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) ทำการขึ้นรูปด้วยวิธี SPS ด้วยความดัน 30 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1300^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าที่ %mol  $\text{ZrO}_2(2.5\text{Y}_2\text{O}_3)$  มากขึ้น ค่าความแข็งแรงจะลดลง ในขณะที่ความเหนียวและความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ 48.75(1.25 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) จะให้ค่าสูงที่สุดคือ  $9.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  และ 1290 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แสดงค่าการปรับปรุงสมบัติความเหนียวและค่าความแข็งแรงของแต่ละตัวอย่าง โดยการใช้เซอร์โคเนีย (Yoshihiko Takano et al., 1998)

L. Pla Zanet et al. (1999) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของ NiAl โดยการเติม ZrO<sub>2</sub> กับ SiC ที่ %vol ที่แตกต่างกันคือ 0 5 10 15 และ 30%vol จากนั้น นำแต่ละตัวอย่างมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธี hot press ด้วยความดัน 30 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400°C เป็นเวลา 5 นาที ผลการทดลองที่ได้พบว่า SiC ที่เติมเข้าไปนั้นสามารถช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรงของ NiAl ได้ ส่วน ZrO<sub>2</sub> ที่เติมเข้าไปนั้นสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความแข็งแรง และความเหนียวได้โดยที่ 15%vol ZrO<sub>2</sub> จะให้ค่าความแข็งแรง และความเหนียวสูงที่สุดคือ 735 MPa และ 11.3 MPa.m<sup>1/2</sup> ตามลำดับ

Sui Lin Shi et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความเหนียวของ Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> โดยการเติม 3Y-TZP โดยได้ทำการทดลองโดยการเติม 3Y-TZP ที่ 0 10 30 และ 50%vol 3Y-TZP จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยวิธี SPS ด้วยความดัน 50 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 5 นาที จากผลการทดลองที่ได้พบว่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อ %3Y-TZP เพิ่มขึ้น ส่วนที่ 30%vol 3Y-TZP ค่าความเหนียวจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 11.94 MPa.m<sup>1/2</sup> ส่วนค่าความแข็งแรงจะมีค่าลดลงเมื่อ %3Y-TZP เพิ่มขึ้น

ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่าเซอร์โคเนียนี้มีสมบัติเด่นในการช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณวัฏภาค และอุณหภูมิการเผาผนึกที่เหมาะสม

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบสมบัติทั้งหมด แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
Particle Size Analyzer	Malvern	Mastersizer S
X-Ray Diffractometer (XRD)	Bruker	D5005
Ball Mill	P.S.C.M.	-
Dryer	ELE	Model SDO 225E1
Vibrator/Shaker	Retsch	AS200
Compression Machine (200 tons)	ELE	ADR2000
Vernier	Mitutoyo	Diamond
High Temperature Furnace (1800°C)	Labquip	Vecstar/VF2
Microhardness Tester	Wilson	450SVD CK-AH
High Speed Diamond Saw	Buehler	Isomet 1000
Grinder&Polisher Machine	Buehler	Ecomet 5
Ultrasonic	NEY	28H
Ion Sputtering Device	JEOL	JFC-1100E
Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL	JSM-6400
Universal Testing Machine	Instron	5569

### 3.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทสาร	ชื่อการค้า	ชนิด/เกรด	ผู้ผลิต
สารตั้งต้น	Aluminum Oxide	CA 5 M	Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.
	Chromium Oxide	-	Carlo Erba Regenti
สารเติมแต่งสมบัติ	Zirconium Oxide	m-ZrO <sub>2</sub>	Riedel-de Haen
สารเพิ่มการยึดเกาะ	Tapioca Starch	Premium Quality	Kriangkrai LTD., Part
สาร Starbilizer	Yttrium Oxide	-	Riedel-de Haen

#### 3.2.1 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide Powder)

ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (อะลูมินา) สูตรเคมี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ไซเกรด CA 5 M เป็นอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก สิ่งเจือปนหลักได้แก่ โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซิลิการ้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก (Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.)

#### 3.2.2 ผงโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide Powder)

ผงโครเมียมออกไซด์ (โครเมียม) สูตรเคมี Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานเซรามิกองค์ประกอบหลักประกอบด้วย โครเมียมร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก แอมโมเนียมร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก คลอไรด์ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ตะกั่วร้อยละ 0.002 โดยน้ำหนัก ซัลเฟตร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก เหล็กร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก Water - soluble matter ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักและมลทินอื่น ๆ ร้อยละ 1.718 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจาก บริษัท คาโรเอบราเรเจนต์ จำกัด)



### 3.2.3 ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide Powder)

ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ (เซอร์โคเนีย) สูตรเคมี  $ZrO_2$  เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานเซรามิก องค์ประกอบหลักประกอบด้วย เซอร์โคเนียร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ไททานเนียมร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซิลิการ้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซัลเฟตร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก เหล็กร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก และมลทินอื่น ๆ ร้อยละ 0.37 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจาก บริษัท รีเดอร์ เดอ ฮัท จำกัด)

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น

องค์ประกอบทางเคมี	อะลูมินา (%wt)*	โครเมียม (%wt)**	เซอร์โคเนีย (%wt)***
$Al_2O_3$	95.0	-	-
$Cr_2O_3$	-	98.0	-
$ZrO_2$	-	-	99.0
$SiO_2$	0.2	-	0.3
$SO_4$	-	0.01	0.2
Fe	-	0.05	0.03
$Fe_2O_3$	0.02	-	-
$Na_2O$	0.3	-	-
CaO	0.1	-	-
$NH_4$	-	0.01	-
Cl	-	0.002	-
Ti	-	-	0.1
Water-soluble matter	-	0.2	-
อื่น ๆ	4.38	1.718	0.37

หมายเหตุ: \* ข้อมูลจาก Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd

\*\* ข้อมูลจาก บริษัท คาโร เอบรา รีเจนต์ จำกัด

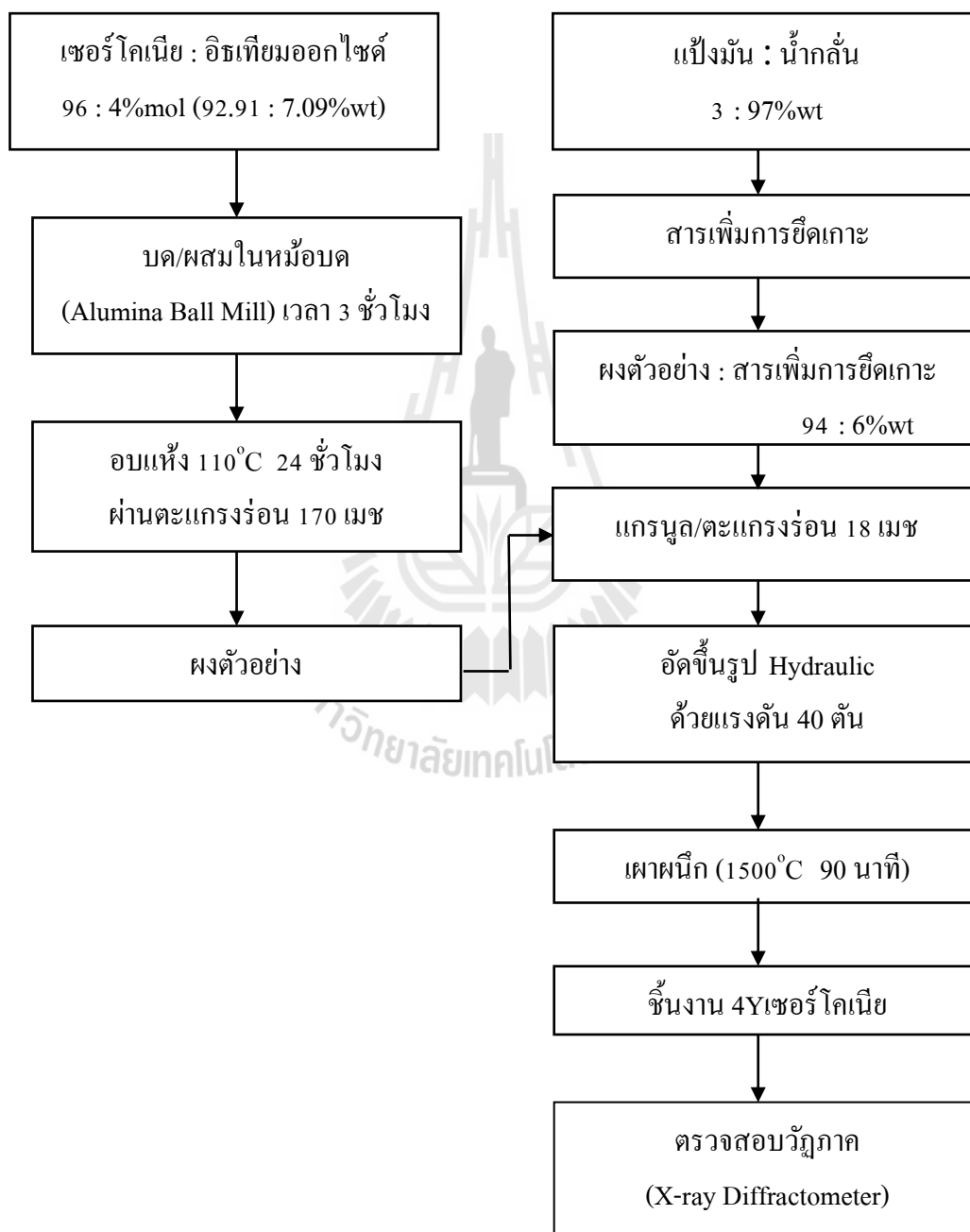
\*\*\* ข้อมูลจาก บริษัท รีเดอร์ เดอ ฮัท จำกัด

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การทดลองเบื้องต้น

##### 3.3.1.1 การ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4% โมลอิทธิพลออกไซด์ (4Y)

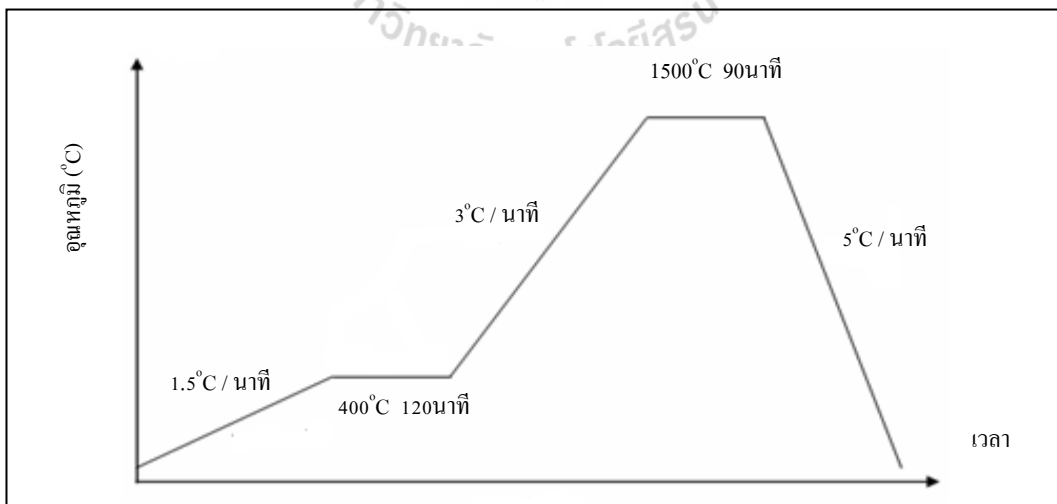
ขั้นตอนและวิธีการ Stabilize เซอร์โคเนีย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการ Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4% โมลอิทธิพลออกไซด์ (4Y)

### 3.3.1.2 การเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4% โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)

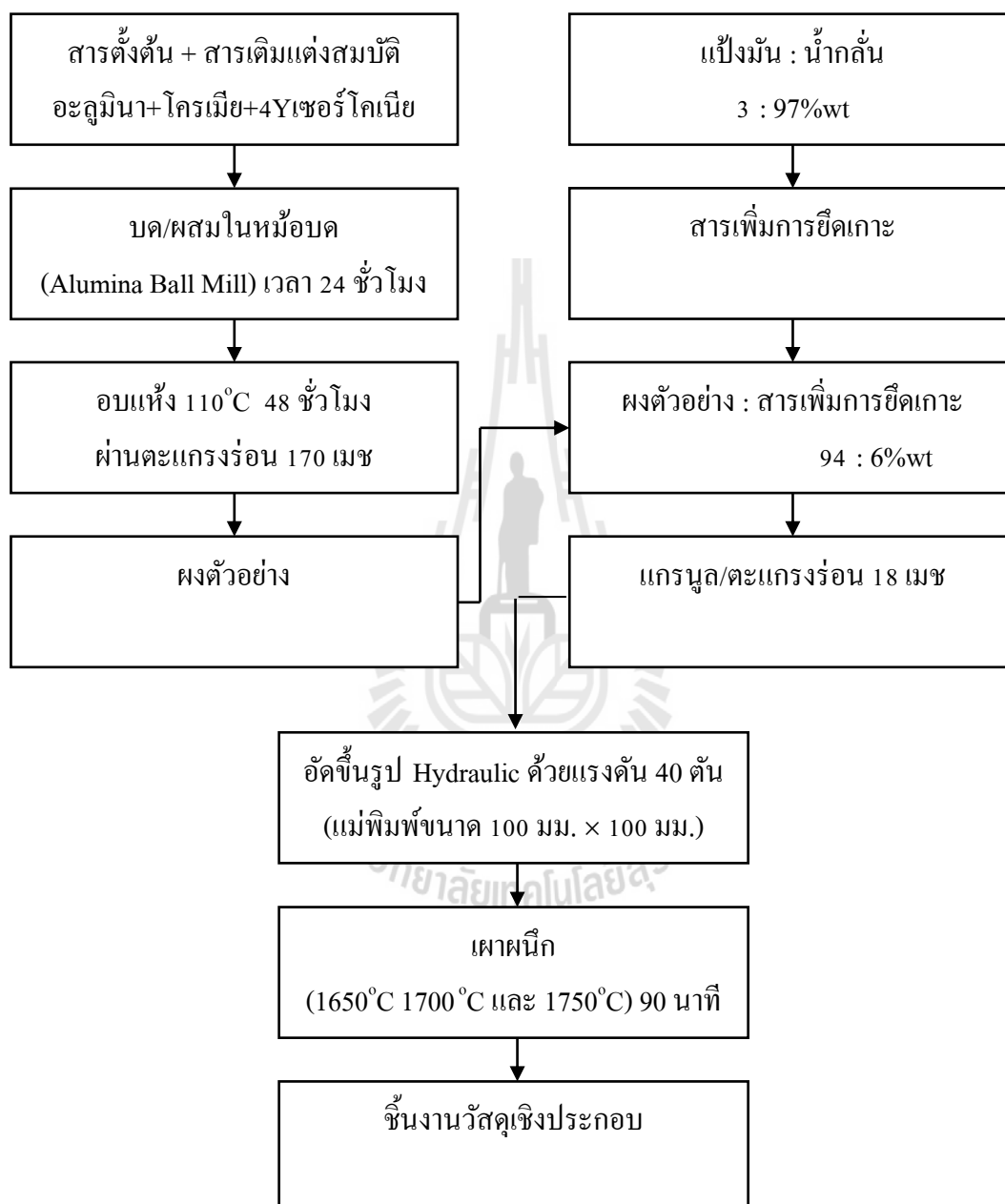
- 1) นำเซอร์โคเนียมาบดผสมแบบเปียกในหม้อบดกับอิธเทียมออกไซด์ จนเข้ากันในอัตราส่วน 96 : 4% โมล (92.91 : 7.09%wt) โดยใช้เวลาบดผสม 3 ชั่วโมง
- 2) นำผงที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 170 เมช (Mesh)
- 3) เตรียมสารเพิ่มการยึดเกาะซึ่งสามารถทำได้โดยนำน้ำกลั่นและ แป้งมัน (Tapioca Starch) มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปต้มแล้วทำการกวนจนกว่าแป้งมันละลายจนหมดกลายเป็นน้ำกาวเหนียว
- 4) นำผงตัวอย่างที่ได้จาก ข้อ 2. มาบดผสมกับสารเพิ่มการยึดเกาะที่ได้จาก ข้อ 3. ในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 6 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำผงตัวอย่างที่มีความเหนียวไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 18 เมช เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมง่ายต่อการขึ้นรูป
- 5) นำผงตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4. มาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกโดยใช้แรงอัด 40 ตัน แม่พิมพ์อัดขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C โดยใช้เวลาเผาแชน้ 90 นาที
- 6) นำชิ้นงานที่ผ่านการเผานี้ที่ได้จากข้อ 5. มาทำการบดแห้งด้วยโกร้งแล้วนำผงที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 120 เมช (Mesh) จากนั้นนำผงตัวอย่างที่ได้ไปทำการตรวจสอบวิฤภาคด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงข้อมูลในการเผานี้กแผ่นตัวอย่างการเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4% โมลอิธเทียมออกไซด์ (4Y)

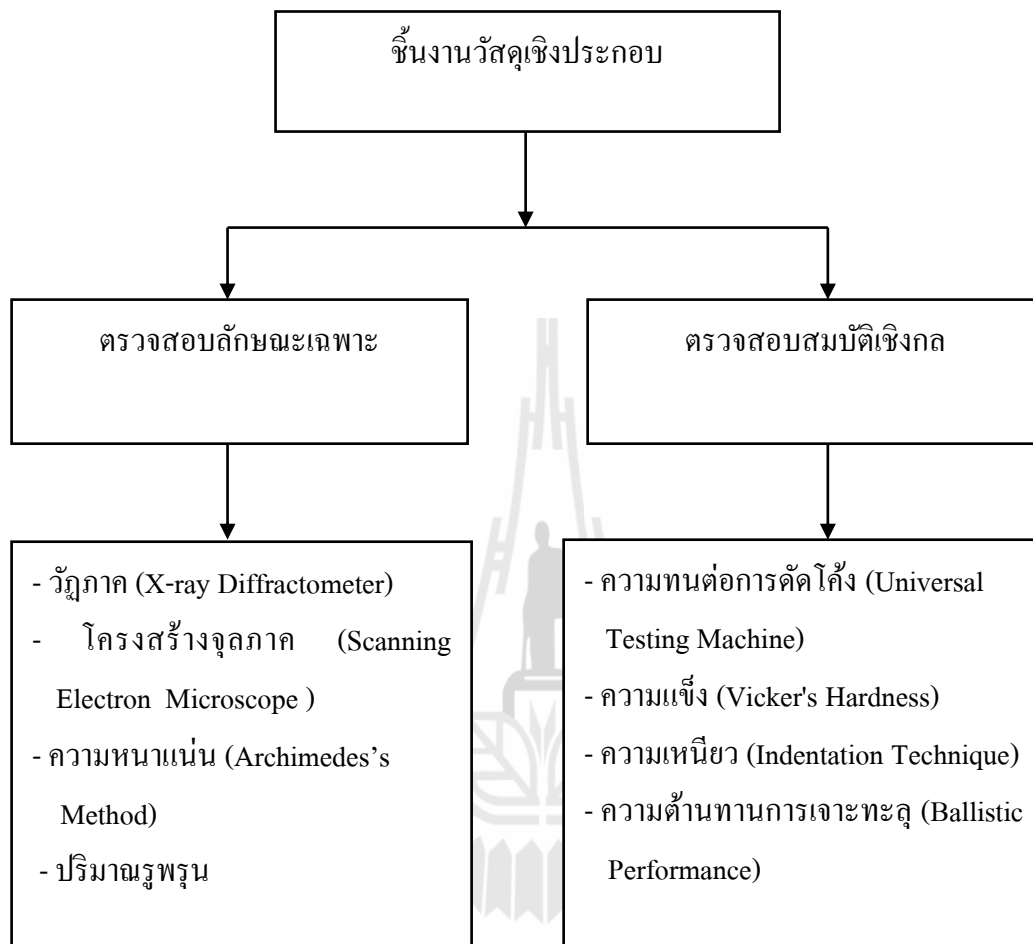
### 3.3.2 การทดลองในงานวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการทดลองแบ่งเป็น 2 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.5

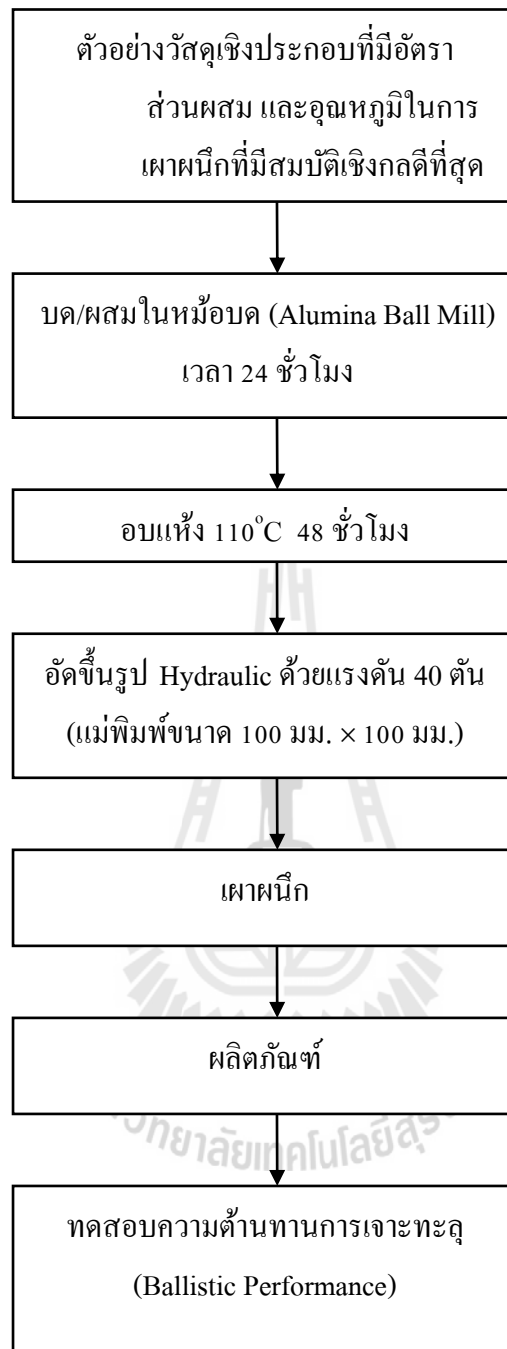


รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตามการทดลองที่ 1

หลังจากนั้นนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากกระบวนการเตรียมในรูปแบบที่ 3.3 จะนำมาตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกลดังแสดงในรูปแบบที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง ตามการทดลองที่ 2

จากรูปที่ 3.3 - 3.5 สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยละเอียด ดังนี้

### 3.3.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น ซึ่งได้แก่ อะลูมินา และโครเมียม ต่อสารเติมแต่งสมบัติ ซึ่งได้แก่ เซอร์โคเนีย ที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-โครเมียม/เซอร์โคเนีย มีสมบัติเชิงกลซึ่งได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว และความต้านทานการเจาะทะลุ ที่เหมาะสมที่สุดต่อการใช้งาน โดยตัวแปรคือ ปริมาณของเซอร์โคเนีย ที่เติมลงในอะลูมินา และอุณหภูมิในการเผาผนึก ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น สารเติมแต่ง และอุณหภูมิในการเผาผนึกของการทดลองที่ 1

รหัสตัวอย่าง	สารตั้งต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		สารเติมแต่ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4Y-ZrO <sub>2</sub>		
A1650	100	0	0	1650	90
AC1650	97	3	0		
AC2Z1650	95	3	2		
AC4Z1650	93	3	4		
AC6Z1650	91	3	6		
A1700	100	0	0	1700	90
AC1700	97	3	0		
AC2Z1700	95	3	2		
AC4Z1700	93	3	4		
AC6Z1700	91	3	6		
A1750	100	0	0	1750	90
AC1750	97	3	0		
AC2Z1750	95	3	2		
AC4Z1750	93	3	4		
AC6Z1750	91	3	6		

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุ โดยการทดลองจะเลือกตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสม และอุณหภูมิในการเผาผนึก ที่ทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 นำมาทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Ballistic Performance) โดยมีตัวแปรคือ ความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มีค่าเท่ากับ 6 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ

### 3.3.4 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

#### 3.3.4.1 การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง

การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของแสง ใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง  
เครื่องมือ: Mastersizer S ของบริษัท Malvern Instruments Ltd.

วิธีการทดสอบ

- 1) ชั่งผงตัวอย่างโดยการสุ่มปริมาณ 2 กรัม
- 2) เตรียมสารละลาย Calgon 1 เปอร์เซ็นต์
- 3) เติมสารละลายในข้อ 2. ผสมกับผงตัวอย่าง 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องสั่นสะเทือนโดยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่อง Particle Size Analyzer



### 3.3.4.2 การตรวจวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟส (Phase Analysis)

การตรวจวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟสของตัวอย่าง โดยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) จากผลึกของสารจะให้แพทเทิร์น (Pattern) การเลี้ยวเบนเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law)

เครื่องมือ: XRD (PW3710 BASED) ของบริษัท Bruker ใช้  $\text{CuK}\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดรังสี  
วิธีการทดสอบ

- 1) โปรมองตัวอย่างลงบนกรอบใส่ผงตัวอย่าง (Sample holder)
- 2) ใช้แผ่นกระจกกดตัวอย่างที่อยู่ในกรอบใส่ผงตัวอย่างให้เรียบแน่น
- 3) นำฝาหลังปิดเข้ากับกรอบใส่ผงตัวอย่างแล้วนำไปตรวจวิเคราะห์  
สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

Generator tension	=	40 KV
Generator current	=	40 mA
Start angle	=	$20^\circ$
End angle	=	$70^\circ$
Time per step	=	0.1s
Step size	=	$0.02^\circ$



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง X-ray diffraction, XRD

### 3.3.5 การเตรียมแผ่นตัวอย่าง

- 1) นำผงอะลูมินา มาบดผสมกับ โครเมียปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นสารตั้งต้น และสารเติมแต่งสมบัติซึ่งจะใช้ (4Y)เซอร์โคเนียปริมาณร้อยละ 0-6 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ทำการบดผสมด้วย Ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำผงที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 3) หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปบดแห้งด้วยโกร่ง เพื่อไม่ให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันแล้วนำผงที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 170 เมช (Mesh) แล้วจะได้ผงตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 90 ไมครอน
- 4) เตรียมสารเพิ่มการยึดเกาะซึ่งสามารถทำได้โดยนำน้ำกลั่นและแป้งมัน (Tapioca Starch) มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปต้มแล้วทำการกวนจนกว่าแป้งมันละลายจนหมดกลายเป็นน้ำกาวเหนียว
- 5) นำผงตัวอย่างที่ได้จาก ข้อ 3. มาบดผสมกับสารเพิ่มการยึดเกาะที่ได้จาก ข้อ 4. ในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 6 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำผงตัวอย่างที่มีความเหนียวไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 18 เมช เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดแกรนูล ง่ายต่อการขึ้นรูป
- 6) นำผงตัวอย่างที่ได้จาก ข้อ 5. มาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (Compression Machine, 200 tons ของบริษัท ELE International) ดังรูปที่ 3.8 โดยใช้แรงอัด 40 ตัน แม่พิมพ์อัดขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร ซึ่งจะอัดให้แผ่นตัวอย่างมีความหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกแรงอัดขนาด 200 ตัน

### 3.3.6 การเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง

นำแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูปจากข้อ 3.3.5 มาเผาผนึกด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง เพื่อให้ชิ้นงานสุกตัวและเพิ่มความหนาแน่นให้กับชิ้นงาน

เครื่องมือ : High Temperature Furnace ( $1800^{\circ}\text{C}$ ) ของบริษัท Labquip

สถานะที่ใช้ในการทดลอง

ช่วงที่ 1

อุณหภูมิ = 400 องศาเซลเซียส

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 1.5 องศาเซลเซียส/นาที

เวลาเผาแซ่ = 120 นาที

ช่วงที่ 2

อุณหภูมิ = 1650 1700 และ 1750 องศาเซลเซียส

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 3 องศาเซลเซียส/นาที

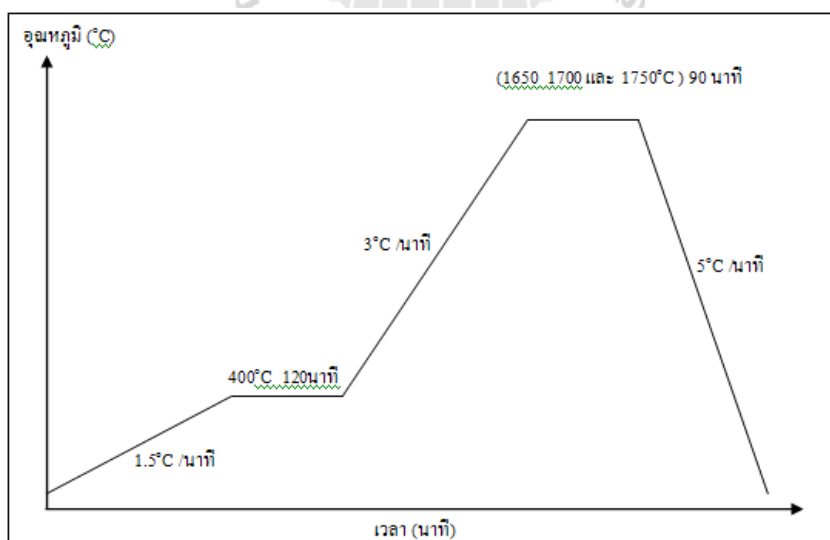
เวลาเผาแซ่ = 90 นาที

ช่วงที่ 3

อุณหภูมิ = 50 องศาเซลเซียส

อัตราการลดลงของอุณหภูมิ = 5 องศาเซลเซียส/นาที

บรรยากาศ = ปกติ



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง

### 3.3.7 การทดสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของตัวอย่าง

การทดสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของตัวอย่าง จะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C373-88

วิธีการทดสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C จากนั้นนำไปพักไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น (Desiccator) แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง ( $W_D$ )
- 2) นำชิ้นงานในข้อที่ 1 ไปต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง (โดยการต้มนั้นต้องให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลา) จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำตัวอย่างในข้อที่ 2 ไปทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ ( $W_{SS}$ )
- 4) นำตัวอย่างที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำแล้ว มาชั่งน้ำหนักอิมมิดิวน้ำ ( $W_S$ ) โดยใช้ผ้าชุบน้ำบิดให้หมาด แล้วเช็ดน้ำส่วนเกินที่ผิวออกแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน
- 5) การคำนวณหาความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของตัวอย่าง

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (V)} = \frac{W_S - W_{SS}}{\rho}$$

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ 1 g/cm<sup>3</sup>

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง (Bulk Density)} = \frac{W_D}{V}$$

$$\text{ปริมาตรรูพรุน (Apparent Porosity)} = \left[ \frac{W_S - W_D}{V} \right] \times 100$$

### 3.3.8 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง (Bending Strength)

ทดสอบความทนต่อการดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM C1161-90 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ (Universal Testing Machine)

- 1) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ
    - ตัดตัวอย่างทดสอบให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 10 x 100 x 10 (กว้าง x ยาว x สูง) มิลลิเมตร ( $\pm 0.05$  มิลลิเมตร) ด้วยเครื่องตัดใบตัดเพชรความเร็วต่ำ (Low Speed Diamond Saw)
    - ลบมุมเหลี่ยมของตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดแล้วนำไปทดสอบสถานะที่ใช้ในการเตรียม
- ใบตัดเพชรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว
- ความเร็วรอบ = 150 รอบ/นาที
- น้ำหนักกดตัด = 150 กรัม
- ใช้น้ำหล่อเย็นขณะตัด

2) การทดสอบความทนต่อการตัดโค้ง

เป็นการทดสอบความทนต่อการตัดโค้ง โดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ ใช้แรงกระทำกับชิ้นงาน 3 จุด (Three-point flexure)

เครื่องมือ : Universal Testing Machine ของบริษัท Instron

วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมาทดสอบ

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจตุรกรรับตัวอย่าง = 2 มิลลิเมตร

ความกว้างของจตุรกรรับตัวอย่าง (Support span) = 50 มิลลิเมตร

ความเร็วในการกดตัดโค้ง (Crosshead speed) = 0.1 มิลลิเมตร/นาที

จำนวนตัวอย่าง = 15 ตัวอย่าง

ทดสอบซ้ำตัวอย่างละ = 3 ครั้ง

ทดสอบที่อุณหภูมิตั้ง

การคำนวณความทนต่อการตัดโค้งคำนวณได้จากสมการ (3-3)

$$\text{MOR} = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ MPa} \quad (3-1)$$

โดย MOR = ความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงาน

P = ขนาดของแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก

L = ความกว้างของจตุรกรรับตัวอย่าง

b = ความกว้างของตัวอย่าง

d = ความสูงของตัวอย่าง

การคำนวณค่าเฉลี่ยของความทนต่อการตัดโค้งคำนวณได้จากสมการ (3-2)

$$\bar{X} = \sum X / N \quad (3-2)$$

โดย  $\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ยของความทนต่อการตัดโค้ง

$\sum X$  = ผลรวมของความทนต่อการตัดโค้ง

N = จำนวนตัวอย่าง

การคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความทนต่อการตัดโค้งคำนวณได้จากสมการ (3-3)

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (3-3)$$

- โดย S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $X_i$  = ค่าความทนต่อการตัดโค้งของตัวอย่าง  
 $\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ยของความทนต่อการตัดโค้ง  
 $N$  = จำนวนตัวอย่าง

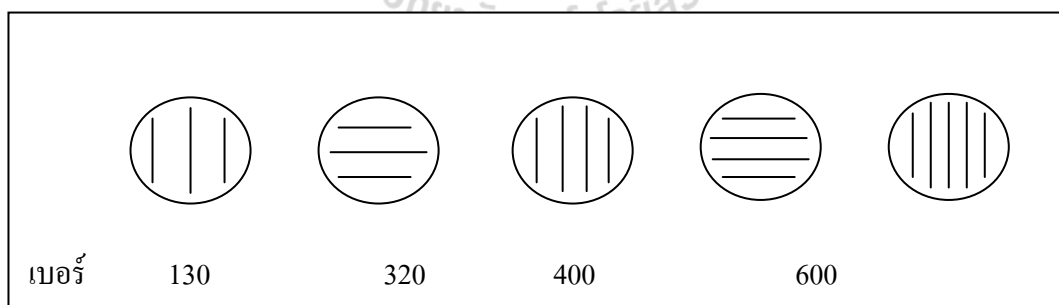
### 3.3.9 ทดสอบความแข็งจุลภาค (Microhardness Test)

การทดสอบความแข็งจุลภาคตามมาตรฐาน ASTM E384-89

เครื่องมือ : Microhardness Tester ของบริษัท Wilson

วิธีทดสอบ

- เตรียมตัวอย่างโดยการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด (เบอร์ 130-1000) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (เมื่อมีการเปลี่ยนกระดาษทรายต้องวางชิ้นงานให้ตัดกับรอยเดิมทุกครั้ง)



รูปที่ 3.10 แสดงการเรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด

- นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. มาขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ บนจานขัดแบบผ้า

- 3) ทำความสะอาดด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เพื่อจัดคราบไขมัน
- 4) ล้างอนุภาคที่จับเกาะผิวหน้าตัวอย่างออก ด้วยเครื่องสั่นสะเทือนคลื่นความถี่สูงแล้วนำไปทดสอบ
- 5) สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ
 

น้ำหนักกด	=	5 กิโลกรัม (49.033 นิวตัน)
เวลากดแช่	=	15 วินาที
กำลังขยายในการวัดรอยกด	=	100 เท่า
จำนวนจุดกด	=	5 จุด

 หัวกดเป็นเพชรรูปทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดมีมุมปลายแหลม 136 องศา

การคำนวณหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (HV) คำนวณตามสมการ (3-4)

$$Hv = 0.1891F / d^2 \quad (3-4)$$

- โดย
- Hv = ความแข็งวิกเกอร์ หน่วยเป็น นิวตัน/ ตารางมิลลิเมตร
  - d = เส้นทแยงมุมของรอยกด หน่วยเป็น มิลลิเมตร โดยหาได้จาก  $(d_1 + d_2) / 2$
  - F = แรงที่ใช้กด หน่วยเป็น นิวตัน

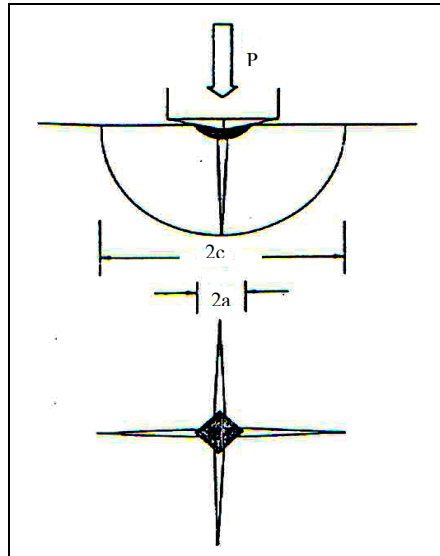
### 3.3.10 การหาค่าความเหนียว

การหาค่าความเหนียวโดยใช้เทคนิคอินเดนเทนชันของแอนทิสและคณะ (Anstis G.R., Chantikul P., Lawn B.R., and Marshall D.B., 1981) คำนวณได้จากสมการ (3-5)

$$K_{IC} = \xi (E/H)^{1/2} P / C^{3/2} \quad (3-5)$$

- โดย
- $K_{IC}$  = ค่าความต้านทานการยืดยาวออกของรอยร้าว (ความเหนียว)
  - E = ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus)
  - H = ค่าความแข็ง
  - P = ขนาดแรงกดอินเดนเทนชัน
  - C = ความยาวรอยแตก/2
  - $\xi$  = ค่าคงที่ ที่ได้จากการทดลองอินเดนเทนชัน โดยใช้หัดกดแบบวิกเกอร์สของแอนทิส และคณะ ซึ่งมีค่าประมาณ  $0.016 \pm 0.004$

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความเหนียวใช้สภาวะเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง  
จุดภาค



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะรอยกุดและความยาวรอยแตกของชิ้นงาน (Ansis et al., 1981)

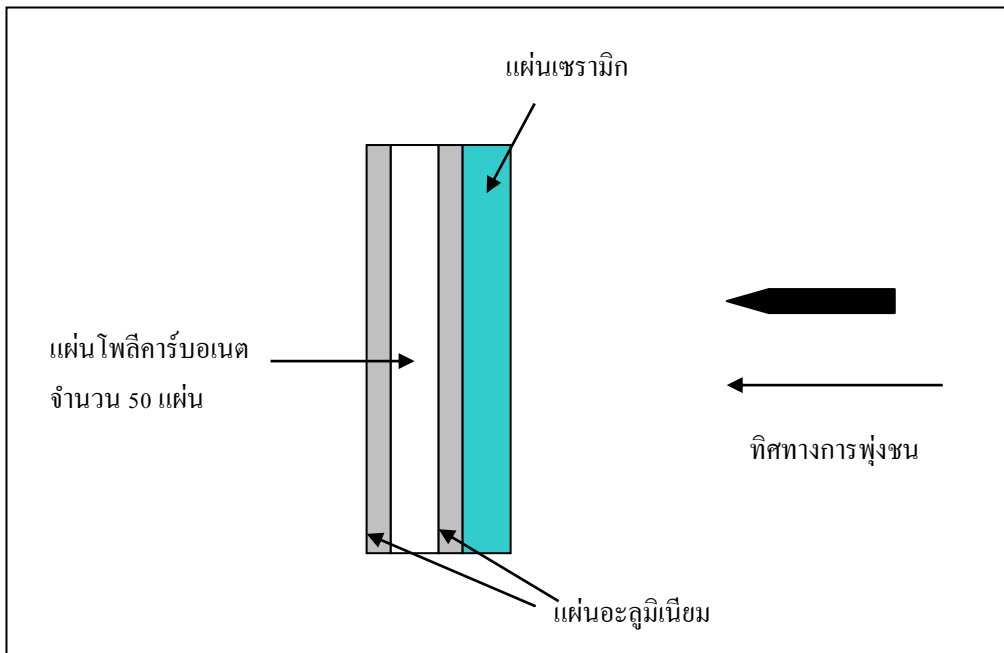
### 3.3.11 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Ballistic Performance Testing)

การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุนั้นจะทดสอบตามมาตรฐาน NIJ.0101.03 และ  
NIJ.0101.04

วิธีทดสอบ

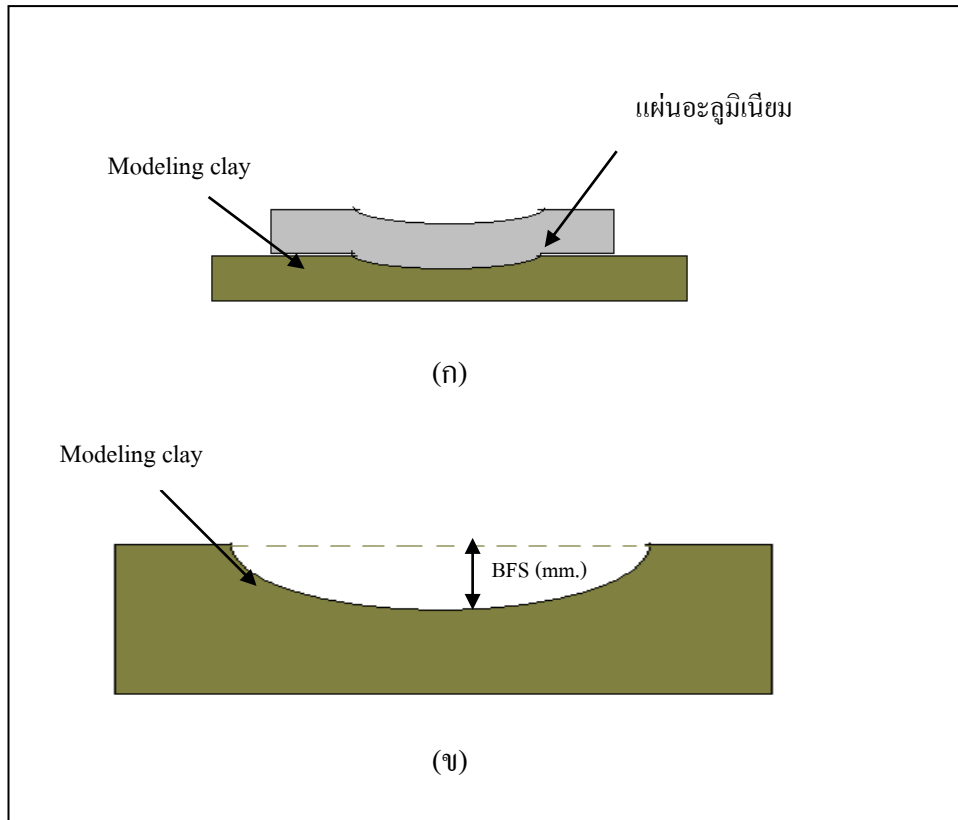
- 1) เตรียมวัสดุ Backing Plate ซึ่งทำโดย การนำแผ่นอะลูมิเนียม ที่มีความหนา 1.38 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น มาปะกบด้านหน้าและหลังของแผ่น โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) ที่มีความหนา 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 50 แผ่น
- 2) นำแผ่นเซรามิกที่ได้จากงานวิจัยมาติดกับ Backing Plate ที่ได้จากข้อ 1. โดยใช้ Epoxy Resin เกรด High Strength ซึ่งตัวอย่างที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.12





รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

- 3) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 2. ไปทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุโดยใช้อาวุธปืน M16 A1 ใช้กระสุนขนาด 5.56 x 45 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วประมาณ 900 เมตรต่อวินาที ที่ระยะการยิง 15 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3
- 4) นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบจากข้อ 3. มาวัดการ โป่งหลัง (Blunt Trauma) ซึ่งจะกิดค่าออกมาโดยเรียกว่า Back Face Signature (BFS) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร สำหรับการวัดค่า Back Face Signature (BFS) นั้นจะวัดโดยวิธี Modeling clay (E. Medvedovski, 2006) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งโดยทั่วไปตามมาตรฐาน NIJ จะยอมรับค่า BFS ได้ไม่เกิน 44 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.13 (ก) และ (ข) แสดงวิธีการวัดค่า BFS โดยวิธี Modeling clay

### 3.3.12 การหาค่าความเปราะ (Brittleness Factor)

การหาค่าความเปราะใช้เทคนิคของ J.B.Quinn (J.B.Quinn, 1997) คำนวณได้จากสมการ (3-6)

$$B = HE / K_{IC}^2 \quad (3-6)$$

- โดย
- B = ค่าความเปราะ
  - E = ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus)
  - H = ค่าความแข็ง
  - $K_{IC}$  = ค่าความเหนียว

### 3.3.13 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Analysis)

การศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

#### 3.3.13.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

- 1) เตรียมตัวอย่าง โดยการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด ดังแสดงตามรูปที่ 3.10
- 2) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. มาขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ บนจานขัดแบบผ้า
- 3) ทำความสะอาดตัวอย่างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ จากนั้นใช้เครื่องเป่าแห้ง (Dryer) เป่าให้แห้ง
- 4) ขจัดสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานออก โดยใช้เครื่องต้นสะเทือนคลื่นความถี่สูง
- 5) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4. นำไปฉาบทองด้วยเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยไอออน (Ion Sputtering Device ของบริษัท JEOL)
- 6) นำตัวอย่างที่ผ่านการฉาบด้วยทองไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.14 แสดงเครื่อง Ion Sputtering Device



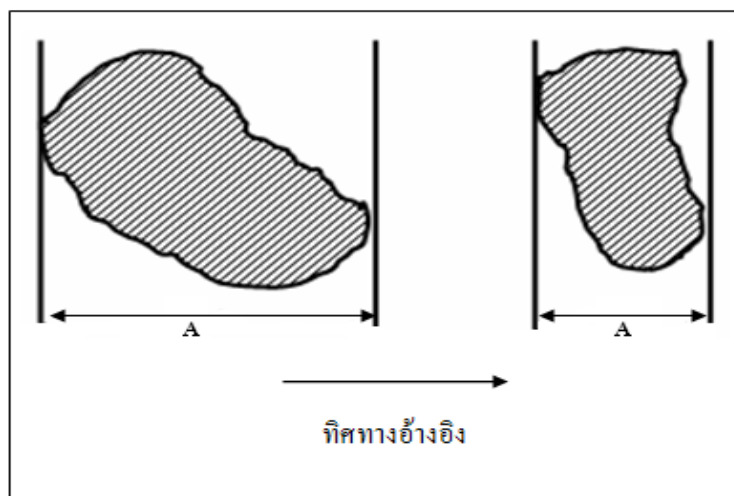
รูปที่ 3.15 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.3.13.2 การวัดขนาดเกรนของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบจะทำในลักษณะเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างในหัวข้อ 3.3.13.1

วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เรต์ (Ferret's method) โดยการลากเส้นขนานและเส้นสัมผัสที่ขอบทั้งสองข้างของเกรนที่ต้องการวัดจากนั้นกำหนดทิศทางอ้างอิง แล้วจึงทำการวัดขนาดของเกรนตามทิศทางนั้นตลอดคั้งแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงการวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เรต์

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และ อภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

##### 4.1.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา

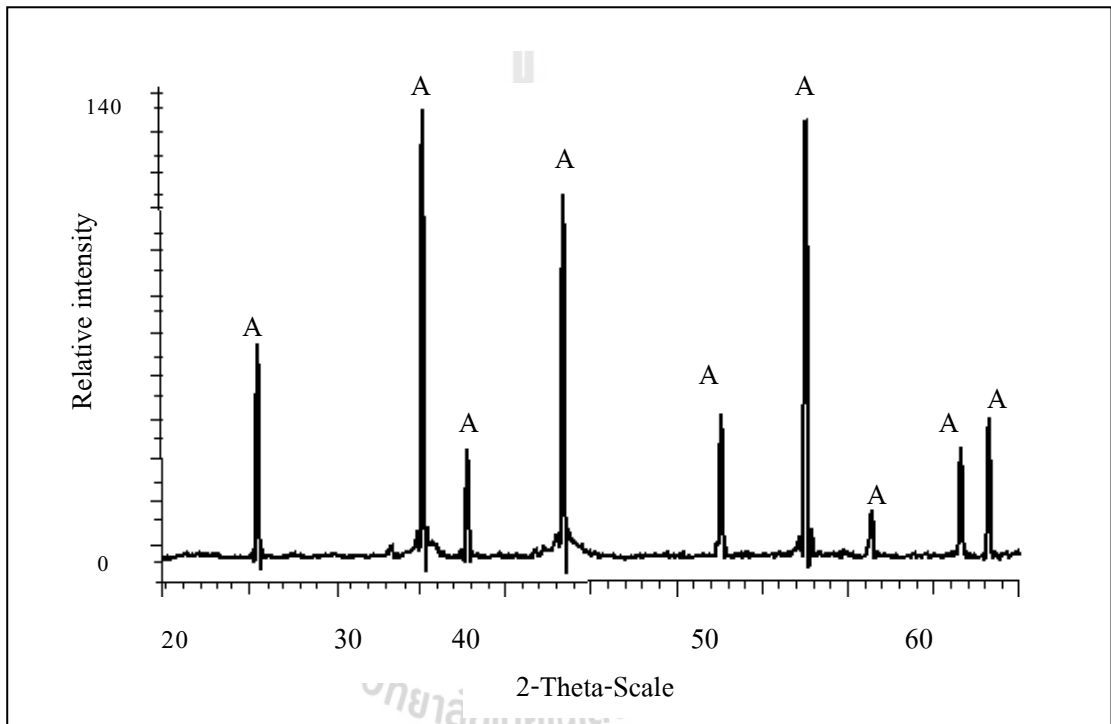
ลักษณะเฉพาะ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	3.69
การกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
- ขนาดที่เล็กกว่า 0.39	ร้อยละ 10
- ขนาดที่เล็กกว่า 5.45	ร้อยละ 50
- ขนาดที่เล็กกว่า 13.30	ร้อยละ 90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) *	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95.0
Na <sub>2</sub> O	0.3
SiO <sub>2</sub>	0.2
CaO	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02
อื่น ๆ	4.38
วิญญภาค	α- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

หมายเหตุ: \* Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.

จากการศึกษาอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์สูง (ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก) จะมีสมบัติเชิงกลสูงด้วย แต่การวิจัยครั้งนี้ใช้อะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่แล้วและลดต้นทุนในการผลิต

#### 4.1.1.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงอะลูมินา

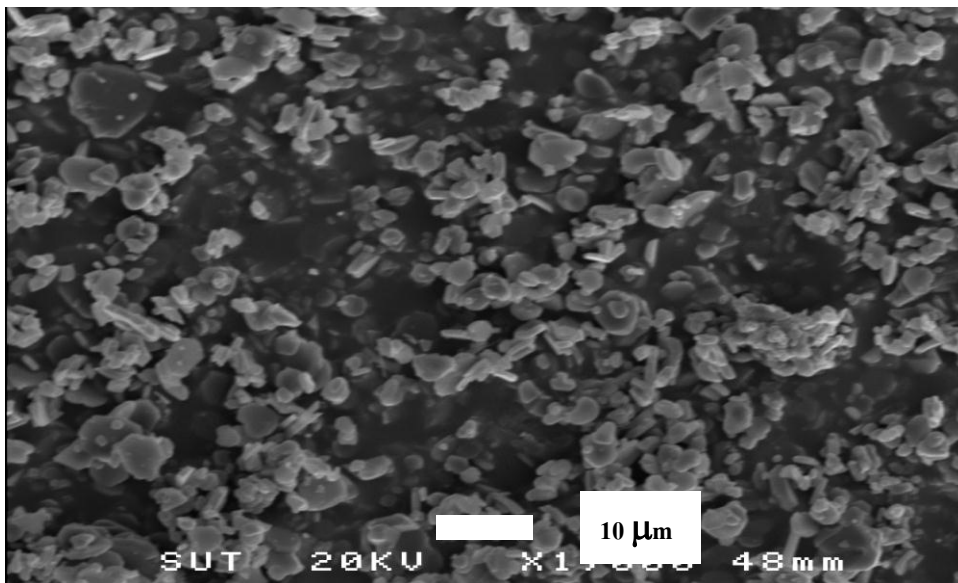
การวิเคราะห์ทางวัฏภาค ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า พีคที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $35.13$  องศา พีคที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $57.51$  และ  $43.36$  องศา ตามลำดับ มีวัฏภาคอยู่ในรูปแอลฟา- อะลูมินา ( $\alpha$ -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Card number 00-010-0173) เพียงวัฏภาคเดียว



รูปที่ 4.1 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงอะลูมินา โดย A แสดงวัฏภาคแอลฟา- อะลูมินา

#### 4.1.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา

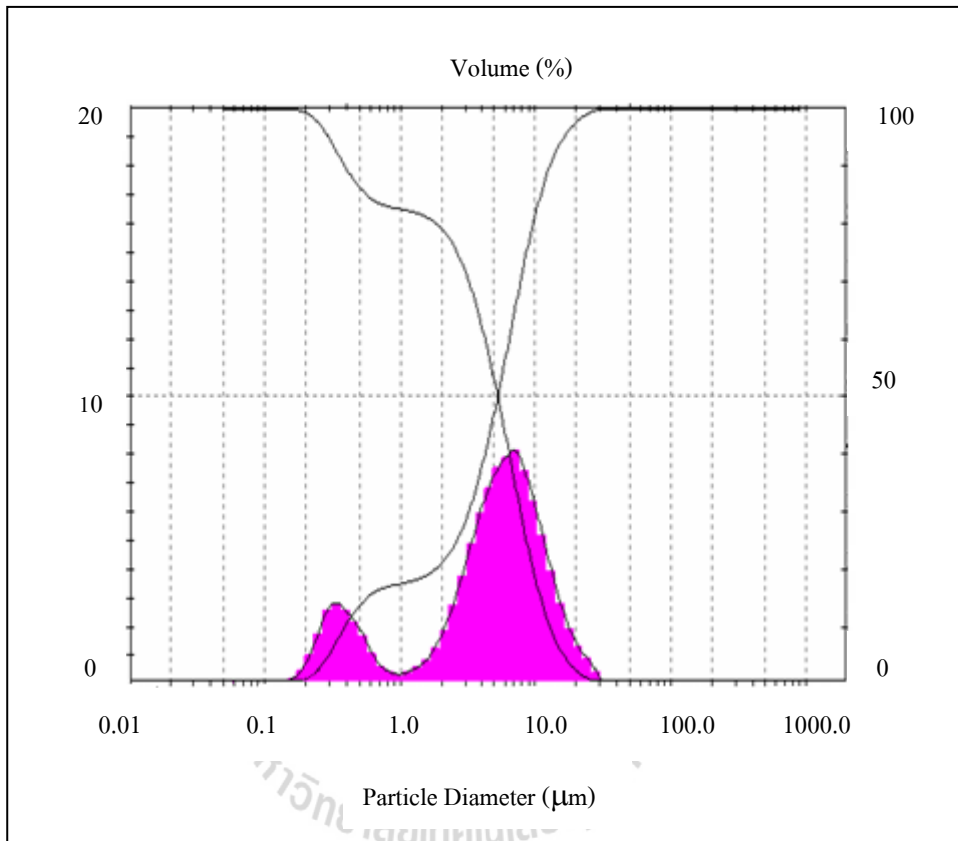
รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าผงอะลูมินามีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับอนุภาคขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 10 ไมครอน



รูปที่ 4.2 แสดงรูปไมโครกราฟของผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.1.1.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงอะลูมินา

รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา จากการศึกษาด้วยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค โดยอาศัยการกระเจิงและเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 5.45 ไมครอน



รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา



#### 4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงโครเมียม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงโครเมียม แสดงในตารางที่ 4.2

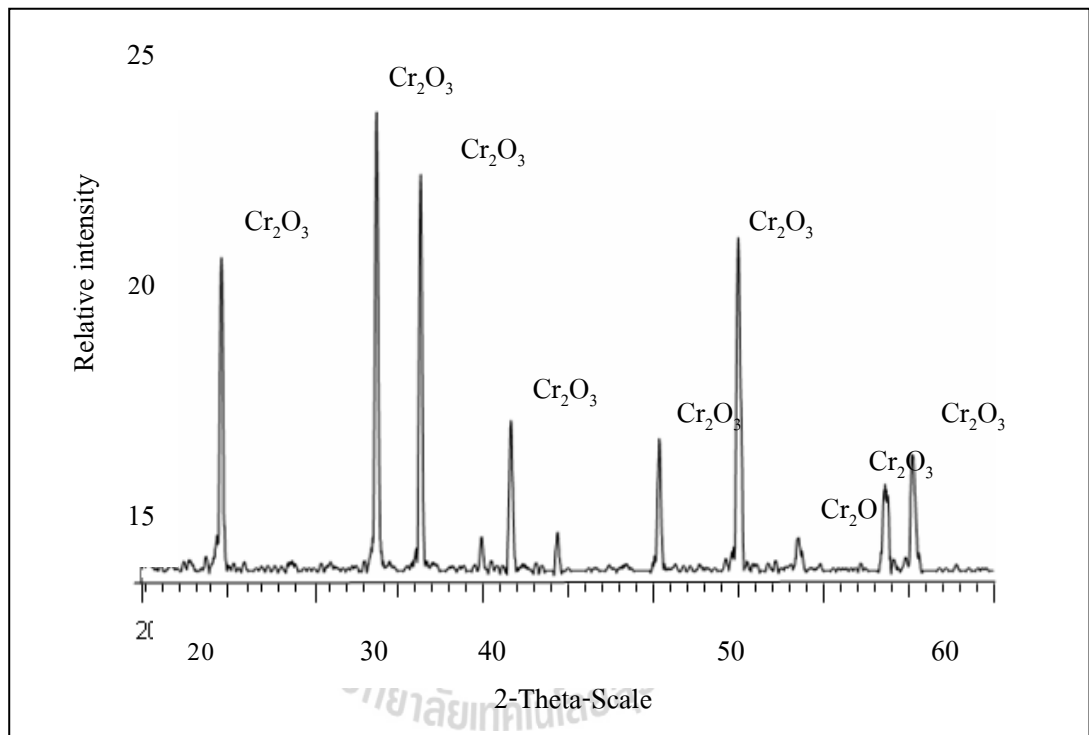
ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะเฉพาะของผงโครเมียม

ลักษณะเฉพาะ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	5.22
การกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน) - ขนาดที่เล็กกว่า 0.26 - ขนาดที่เล็กกว่า 0.53 - ขนาดที่เล็กกว่า 3.66	ร้อยละ 10 ร้อยละ 50 ร้อยละ 90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*  Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> Cl SO <sub>4</sub> Fe Water-soluble matter อื่น ๆ	  98 0.01 0.002 0.01 0.05 0.2 1.718
วิฤภาค	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

หมายเหตุ: \* ข้อมูลจาก บริษัท คาโร เอบริา รีเจนต์ จำกัด

#### 4.1.2.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงโครเมียม

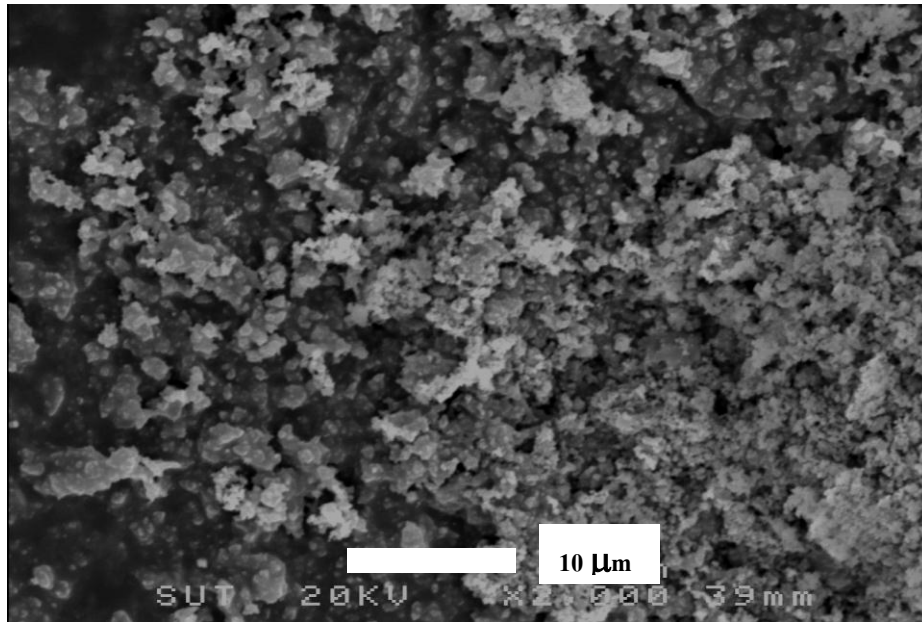
การวิเคราะห์วัฏภาค ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า พีคที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 33.58 องศา พีคที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 36.19 และ 54.86 องศา ตามลำดับ มีวัฏภาคอยู่ในรูปโครเมียมออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) (Card number 00-006-0504) เพียงวัฏภาคเดียว



รูปที่ 4.4 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงโครเมียม โดย  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  แสดงวัฏภาคโครเมียมออกไซด์

#### 4.1.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงโครเมียม

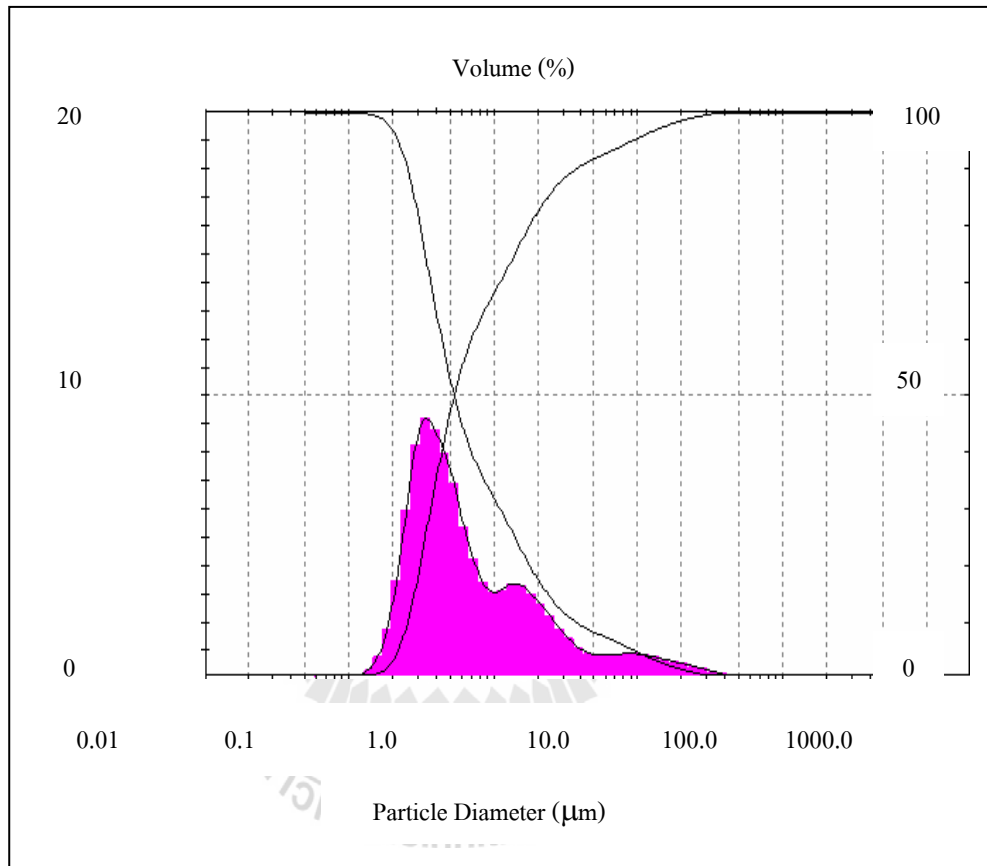
รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าผงโครเมียมมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับอนุภาคขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคค่อนข้างละเอียด อยู่ในช่วงประมาณ 0.1 ถึง 5 ไมครอน



รูปที่ 4.5 แสดงรูปไมโครกราฟของผงโครเมียมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.1.2.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของโครเมียม

รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของโครเมียม จากการศึกษาด้วยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค โดยอาศัยการกระเจิงและเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์แสดงใน รูปที่ 4.6 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 0.53 ไมครอน



รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของโครเมียม

#### 4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย แสดงในตารางที่ 4.3

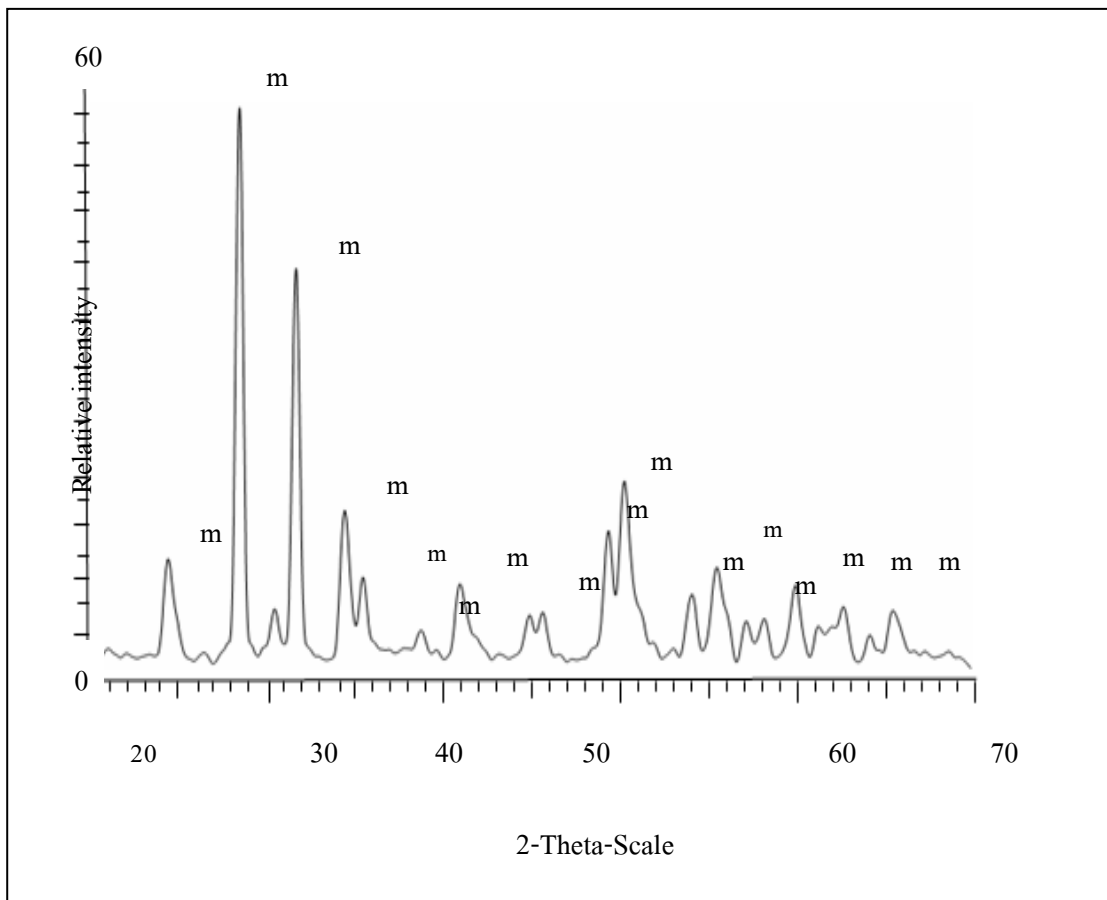
ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย

ลักษณะเฉพาะ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	5.68
การกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน) - ขนาดที่เล็กกว่า 0.48 - ขนาดที่เล็กกว่า 13.67 - ขนาดที่เล็กกว่า 21.50	ร้อยละ 10 ร้อยละ 50 ร้อยละ 90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)* ZrO <sub>2</sub> Fe Ti SiO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> อื่น ๆ	99 0.03 0.1 0.3 0.2 0.37
วิฤภาค	m-ZrO <sub>2</sub>

หมายเหตุ:\* ข้อมูลจาก บริษัท รีเคอร์ เคอ ฮัท จำกัด

#### 4.1.3.1 การวิเคราะห์ทางวิทยาของผงเซอร์โคเนีย

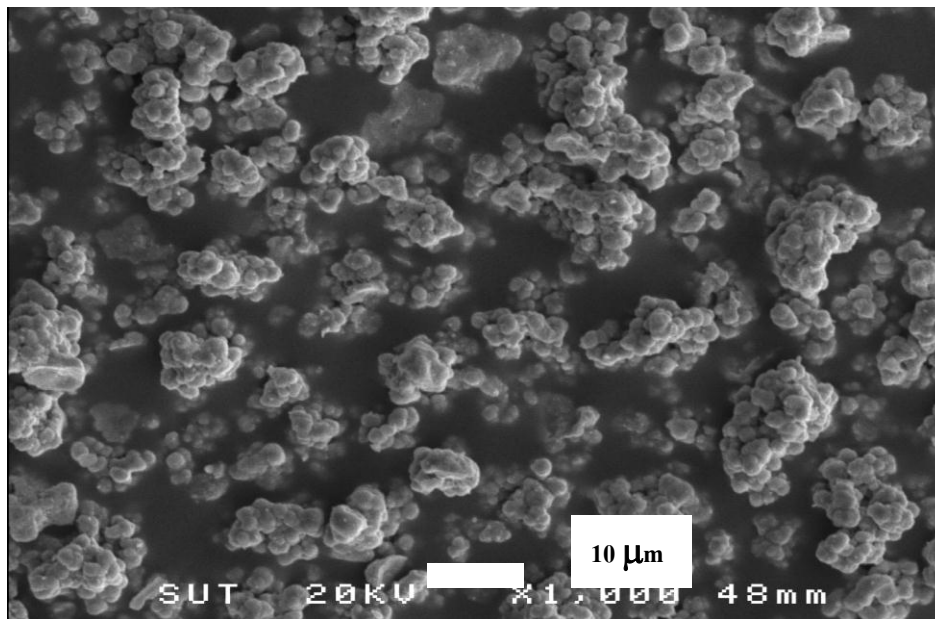
การวิเคราะห์ทางวิทยา ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า พีคที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 28.17 องศา พีคที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 31.46 และ 50.11 องศา ตามลำดับ มีวิทยาอยู่ในรูปโมโนคลินิก-เซอร์โคเนีย ( $m\text{-ZrO}_2$ ) (Card number 00-037-1484) เพียงวิทยาเดียว



รูปที่ 4.7 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงเซอร์โคเนีย โดย m แสดงวิทยาโมโนคลินิก-เซอร์โคเนีย ( $m\text{-ZrO}_2$ )

#### 4.1.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงเซอร์โคเนีย

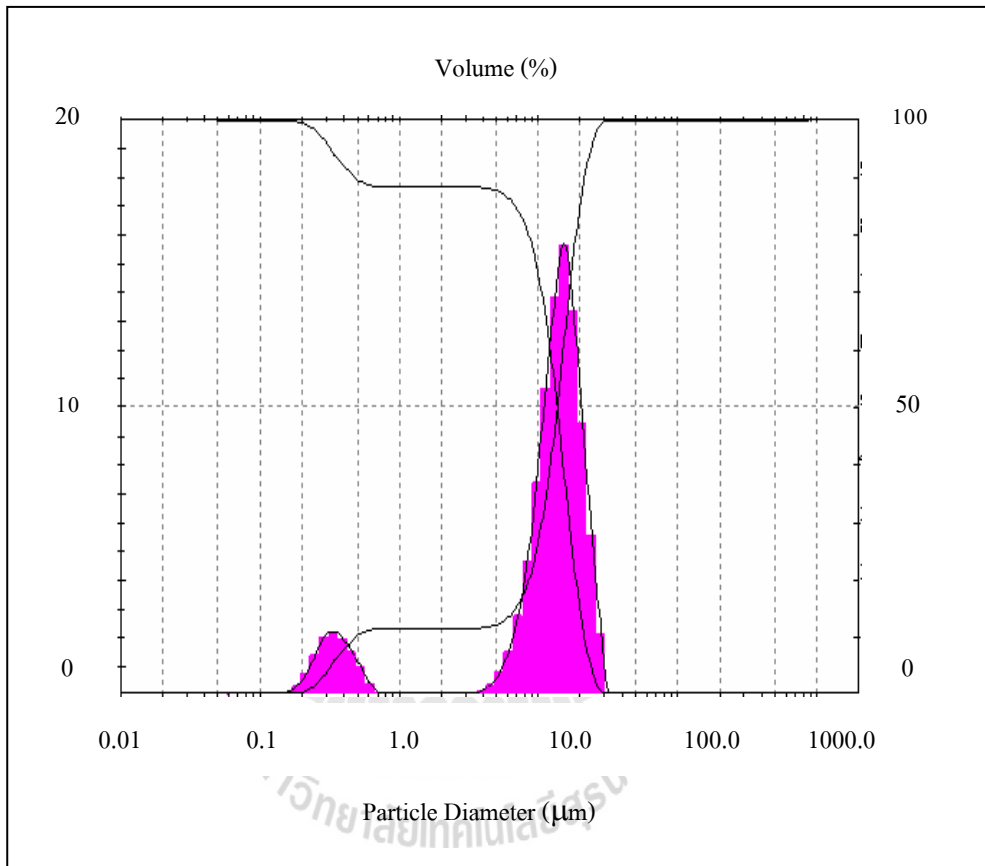
รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าผงเซอร์โคเนียมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีการกระจายตัวที่แคบและจับตัวกันเป็นก้อน มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 20 ไมครอน



รูปที่ 4.8 แสดงรูปไมโครกราฟของผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.1.3.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงเซอร์โคเนีย

รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของเซอร์โคเนีย จากการศึกษาด้วยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค โดยอาศัยการกระเจิงและเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์แสดงใน รูปที่ 4.9 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 13.67 ไมครอน



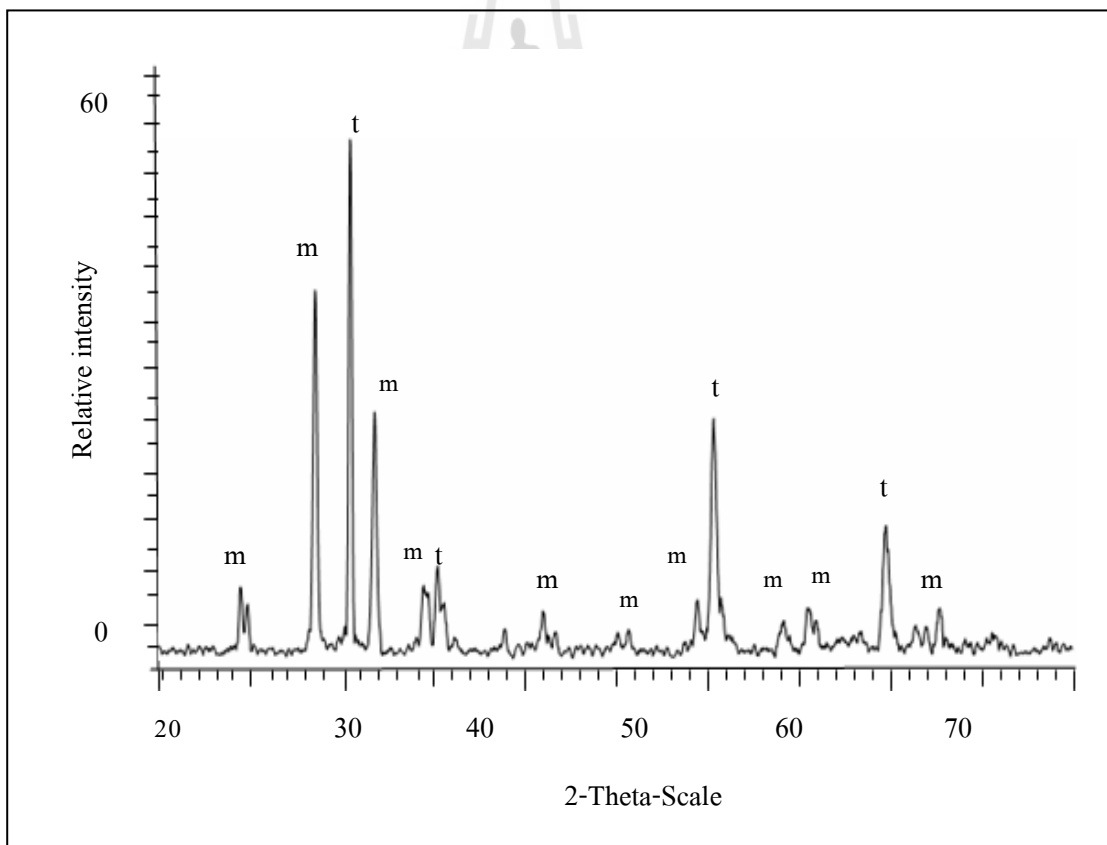
รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของเซอร์โคเนีย



#### 4.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิทธิยมออกไซด์ (4Y)

##### 4.1.4.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิทธิยมออกไซด์ (4Y)

การวิเคราะห์วัฏภาค ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น (Peak) ที่แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า มีพีคของเตตระโกนอลเซอร์โคเนียเกิดขึ้น ซึ่งพีค เตตระโกนอลเซอร์โคเนียที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 30.14 องศา พีคที่มีความเข้มขึ้นรองลงมาอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 50.23 และ 59.76 องศา ตามลำดับ (Card number 01-070-4430)



รูปที่ 4.10 แสดง XRD แพทเทิร์นของผง 4Y เซอร์โคเนีย โดย m แสดงวัฏภาคโมโนคลีนิก ( $m\text{-ZrO}_2$ ) และ t แสดงวัฏภาคเตตระโกนอล ( $t\text{-ZrO}_2$ )

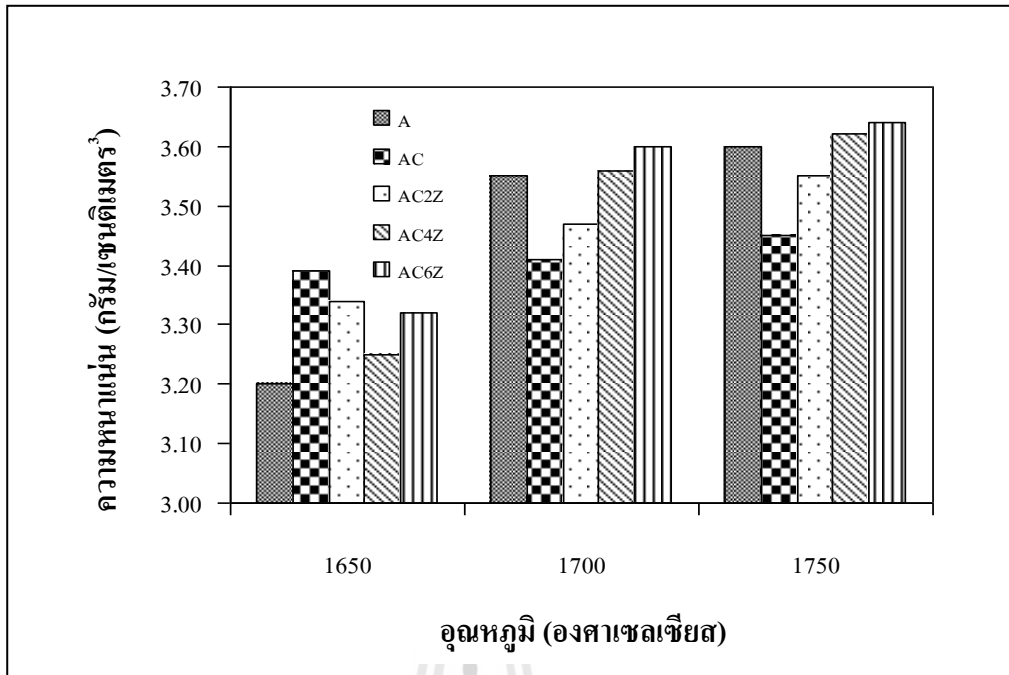
4.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของวัสดุ เซิงประกอบ อะลูมินา-โครเมียม/เซอร์โคเนีย หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 90 นาที

4.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน

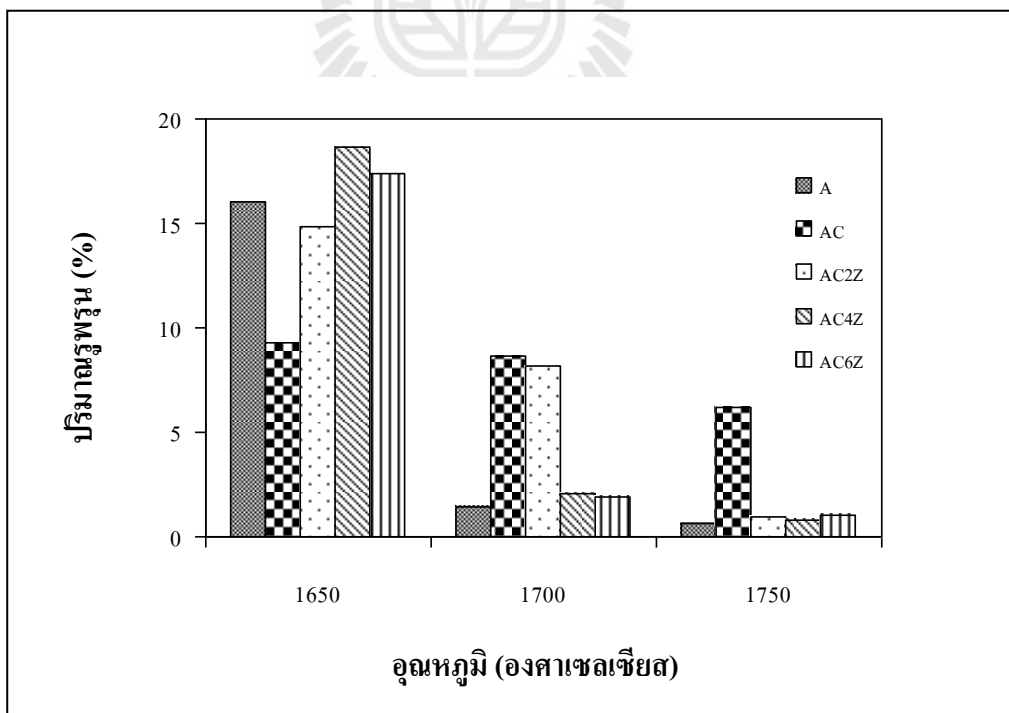
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของแต่ละตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของวัสดุเซิงประกอบแต่ละตัวอย่าง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รหัสตัวอย่าง	ความหนาแน่น (Bulk Density) (กรัม/เซนติเมตร <sup>3</sup> )	ปริมาณรูพรุน (%) (Apparent Porosity)
1650	A1650	3.20	16.01
	AC1650	3.39	9.28
	AC2Z1650	3.25	18.67
	AC4Z1650	3.34	14.86
	AC6Z1650	3.37	16.02
1700	A1700	3.55	1.45
	AC1700	3.41	8.65
	AC2Z1700	3.47	8.20
	AC4Z1700	3.56	2.07
	AC6Z1700	3.60	1.89
1750	A1750	3.60	0.64
	AC1750	3.45	6.22
	AC2Z1750	3.55	0.93
	AC4Z1750	3.62	0.80
	AC6Z1750	3.64	1.04

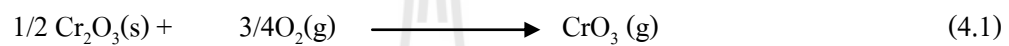


รูปที่ 4.11 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

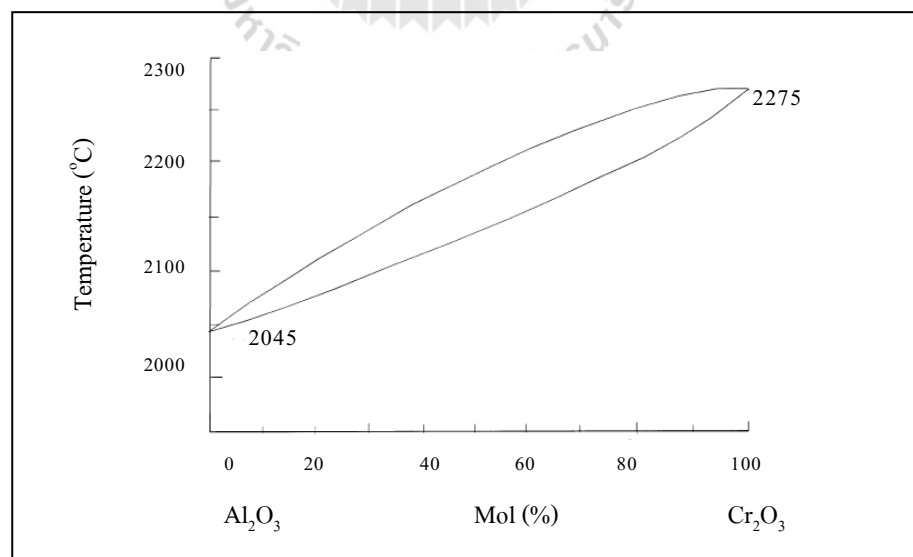


รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณรูพรุนของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของแต่ละตัวอย่าง ดังตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 พบว่า โครเมียที่เติมเข้าไปส่งผลให้ความหนาแน่นของอะลูมินาลดลง เนื่องจากโครเมียมั้นมีจุดหลอมเหลวที่สูง (ประมาณ 2330°C) (H. Gitzen, 1997) มีผลทำให้ความสามารถในการเผาผลาญของอะลูมินาลดลงจึงส่งผลให้ปริมาณของรูพรุนในอะลูมินาเพิ่มขึ้น และหากพิจารณาแผนภูมิวัฏภาคระหว่างอะลูมินาและโครเมียม ซึ่งสอดคล้องกับในรูปที่ 4.13 ที่แสดงให้เห็นว่าโครเมียมีผลในการเพิ่มอุณหภูมิการเผาผลาญของอะลูมินา และพบว่าการเผาผลาญโครเมียในบรรยากาศปกตินั้น โครเมียจะเกิดการเปลี่ยนรูปจาก  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ไปเป็น  $\text{CrO}_3$  ดังสมการที่ 4.1 ให้ความหนาแน่นของอะลูมินาลดลง (Hirata et al., 2000)

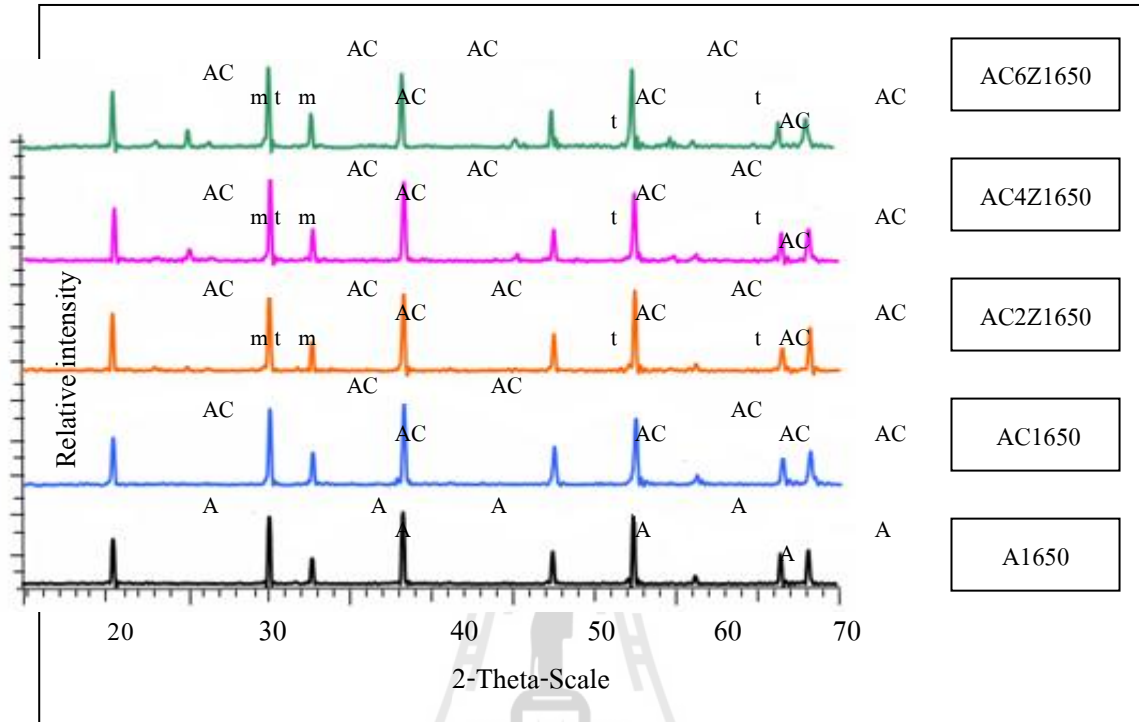


ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนีย (ผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลลิธเทียมออกไซด์) ในปริมาณร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก นั้นจะทำให้ความหนาแน่นของอะลูมินา-โครเมียเซรามิกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก  $\text{m-ZrO}_2$  เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้นส่งผลให้ปริมาณของรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบลดลง (Yoshihiko Takano et al., 1998) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนาแน่นของแต่ละตัวอย่างจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการสุกตัวเพิ่มขึ้น (P.G.Rao et al., 2003)

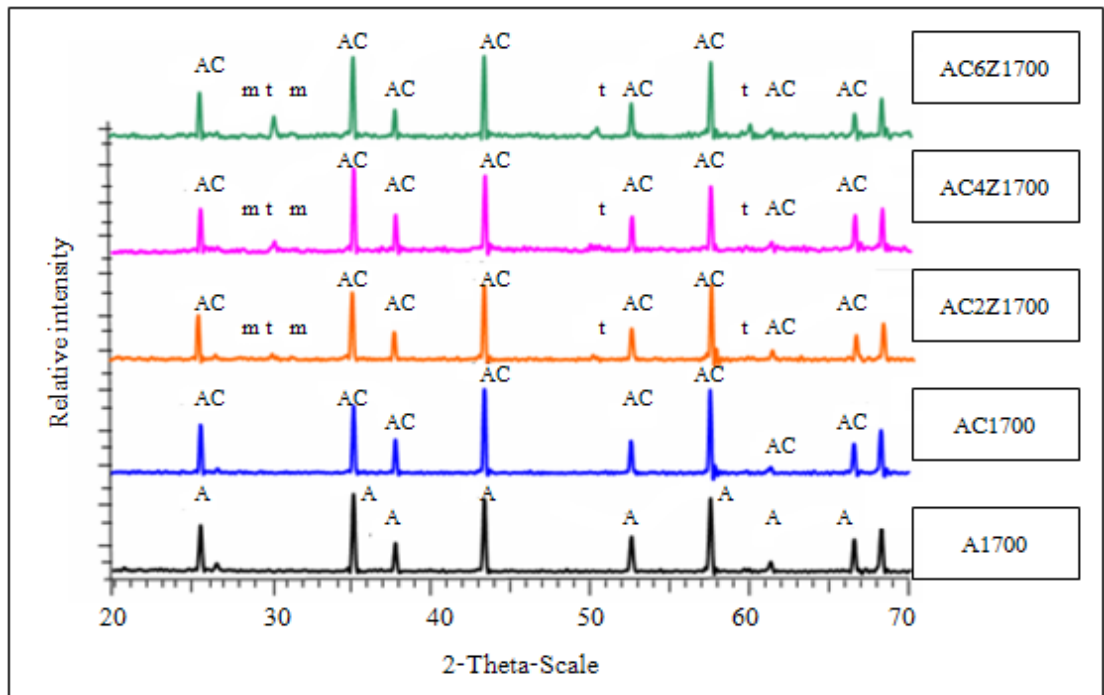


รูปที่ 4.13 แสดงแผนภูมิวัฏภาคระหว่างอะลูมินาและโครเมียออกไซด์ (E.N. Bunting, 1931)

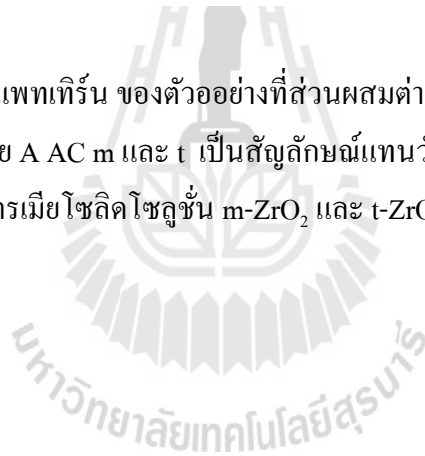
#### 4.2.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค

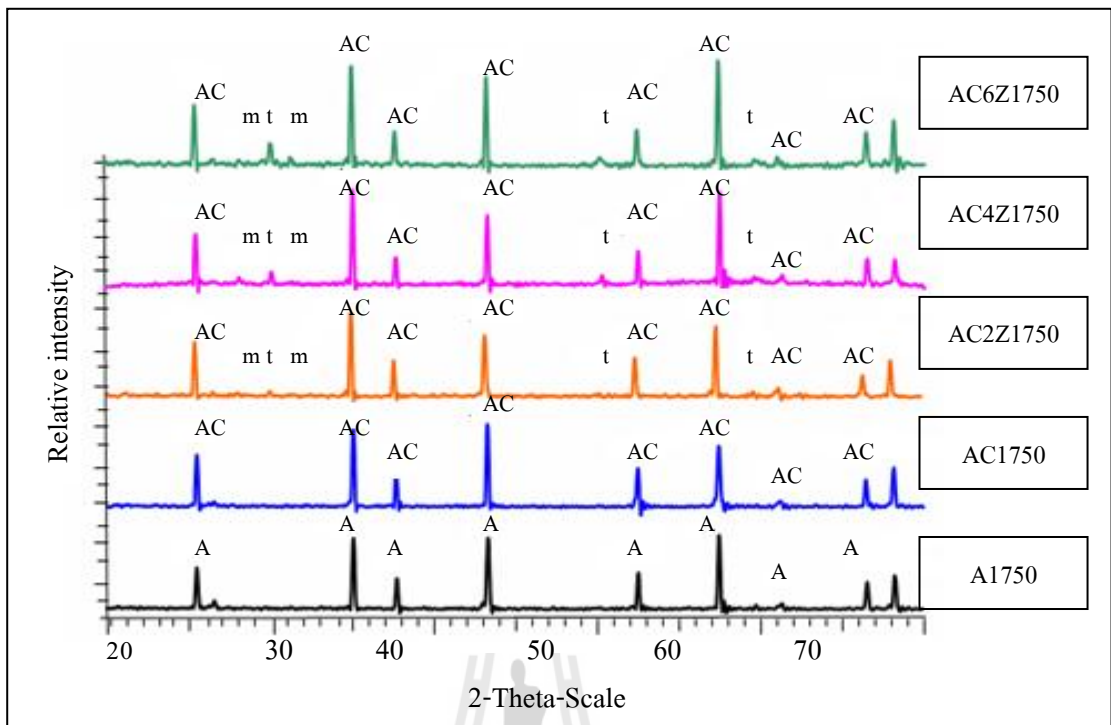


รูปที่ 4.14 แสดง XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1650°C โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิคโซลูชัน m-ZrO<sub>2</sub> และ t-ZrO<sub>2</sub> ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แสดง XRD แพทเทิร์น ของตัวอย่างที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1700°C โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียไฮดรอกไซด์โซลูชัน m-ZrO<sub>2</sub> และ t-ZrO<sub>2</sub> ตามลำดับ

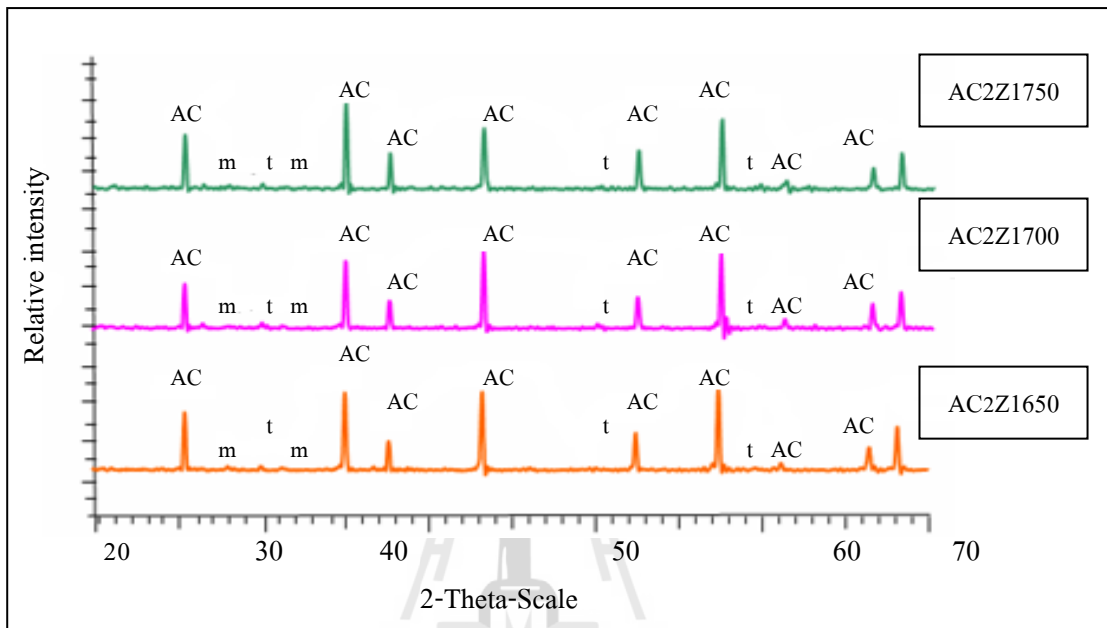




รูปที่ 4.16 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1750°C โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิดโซลูชัน m-ZrO<sub>2</sub> และ t-ZrO<sub>2</sub> ตามลำดับ

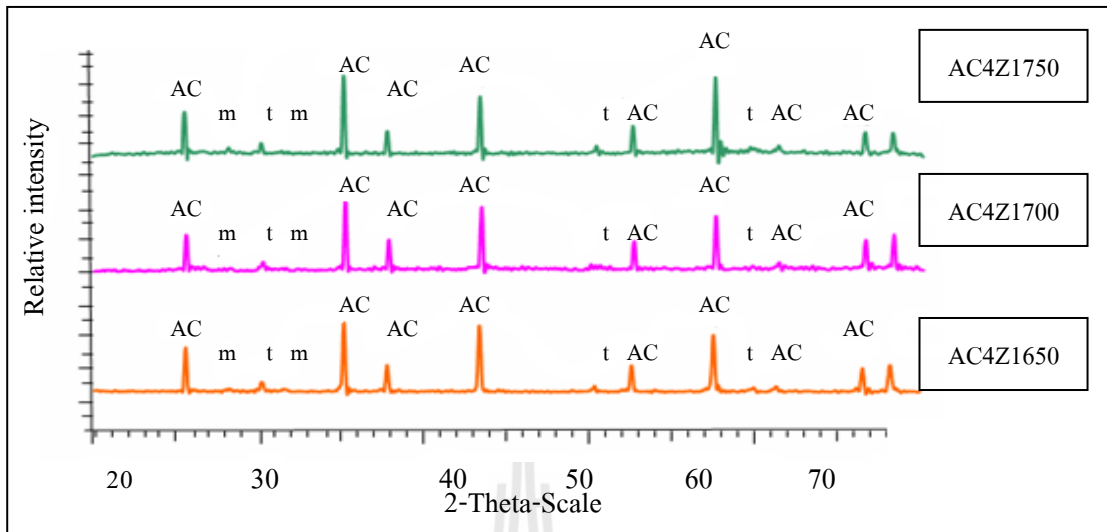
รูปที่ 4.14-4.16 แสดงผลการวิเคราะห์ทางวัฏภาคด้วยเครื่อง XRD ของแต่ละตัวอย่างหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่า อะลูมินาร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก แสดงพีคของอัลฟาอะลูมินาซึ่งมีลักษณะเหมือนกับ XRD แพทเทิร์นของผงอะลูมินาซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 และเมื่อเติมโครเมียเข้าไปพบว่า โครเมียจะซึมผ่าน (Diffuse) อะลูมินาระหว่างการเผาเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution) อะลูมินาโครเมียอย่างสมบูรณ์ (Takehiko Hirata et al., 2000) พบว่า พีคที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.14 องศา พีคที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 43.34 และ 57.48 องศา ตามลำดับ (Card number 01-073-0027) ซึ่ง วัฏภาคเหล่านี้เกิดจากการซึมผ่าน (Diffuse) ระหว่างการเผา และเมื่อเติม 4Yเซอร์โคเนีย ในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เข้าไปในตัวอย่างก็จะปรากฏวัฏภาคของ m-ZrO<sub>2</sub> (Card number 00-037-1484) และ t-ZrO<sub>2</sub> (Card number 01-070-4430) ซึ่งวัฏภาคเหล่านี้จะมีปริมาณพีคเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ 4Yเซอร์โคเนียที่เติมเข้าไป และจะไม่ปรากฏพีคอื่น ๆ เข้ามาเจือปน และเมื่อ

พิจารณาตัวอย่างที่มีปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เติมเข้าไปในปริมาณที่ร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.17-4.19 พบว่าไม่ปรากฏฟิสิกอื่น ๆ เข้ามาเจือปนเช่นเดียวกัน

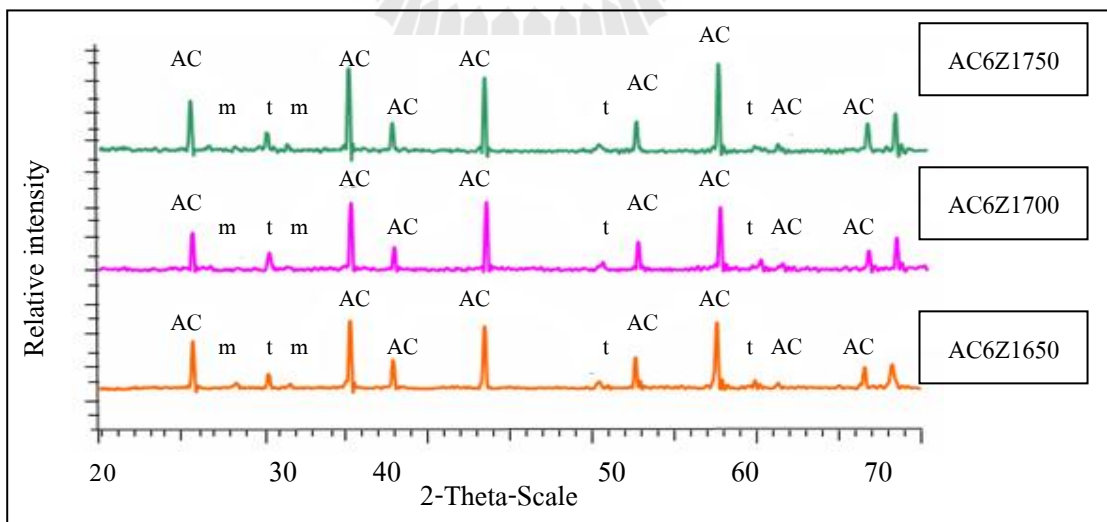


รูปที่ 4.17 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Y เซอร์โคเนียร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมีย โซลิด โซลูชัน  $m\text{-ZrO}_2$  และ  $t\text{-ZrO}_2$  ตามลำดับ





รูปที่ 4.18 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 4 โดย น้ำหนัก หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิดโซลูชัน  $m\text{-ZrO}_2$  และ  $t\text{-ZrO}_2$  ตามลำดับ



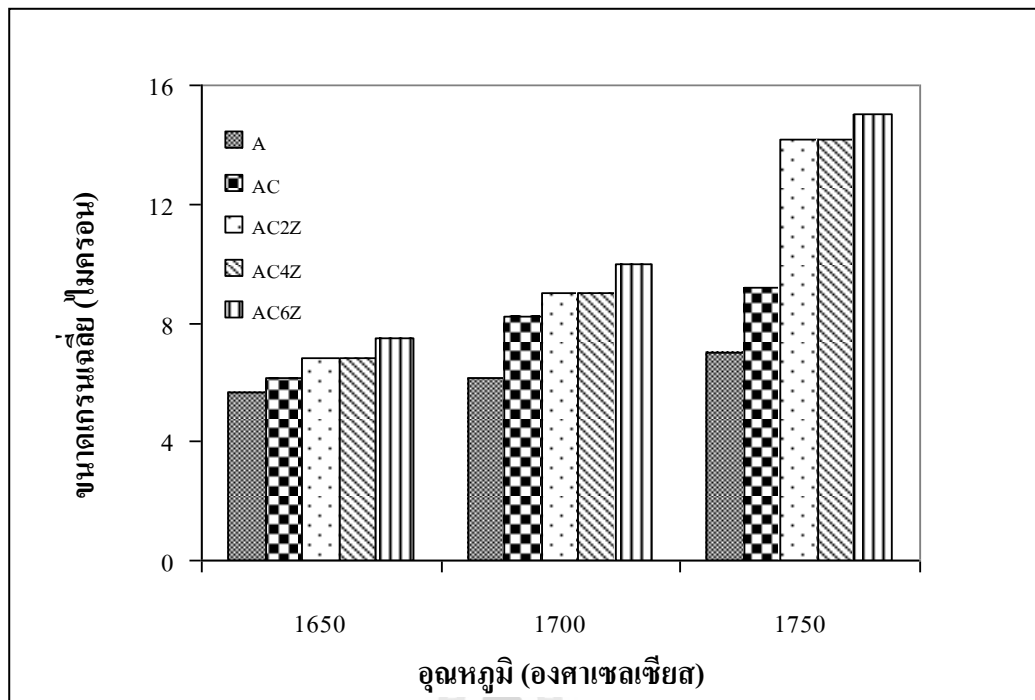
รูปที่ 4.19 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Yเซอร์โคเนียร้อยละ 6 โดย น้ำหนัก หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดย A AC m และ t เป็นสัญลักษณ์แทนวัฏภาคของอะลูมินา อะลูมินาโครเมียโซลิดโซลูชัน  $m\text{-ZrO}_2$  และ  $t\text{-ZrO}_2$  ตามลำดับ

#### 4.2.3 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อขนาดเกรน

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อขนาดเกรนของวัสดุเชิงประกอบแต่ละตัวอย่าง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รหัสตัวอย่าง	ขนาดเกรนเฉลี่ย* (ไมครอน)
1650	A1650	5.65
	AC1650	6.15
	AC2Z1650	6.79
	AC4Z1650	6.93
	AC6Z1650	7.51
1700	A1700	6.15
	AC1700	8.19
	AC2Z1700	9.00
	AC4Z1700	9.61
	AC6Z1700	9.98
1750	A1750	7.00
	AC1750	9.18
	AC2Z1750	14.20
	AC4Z1750	14.50
	AC6Z1750	15.00

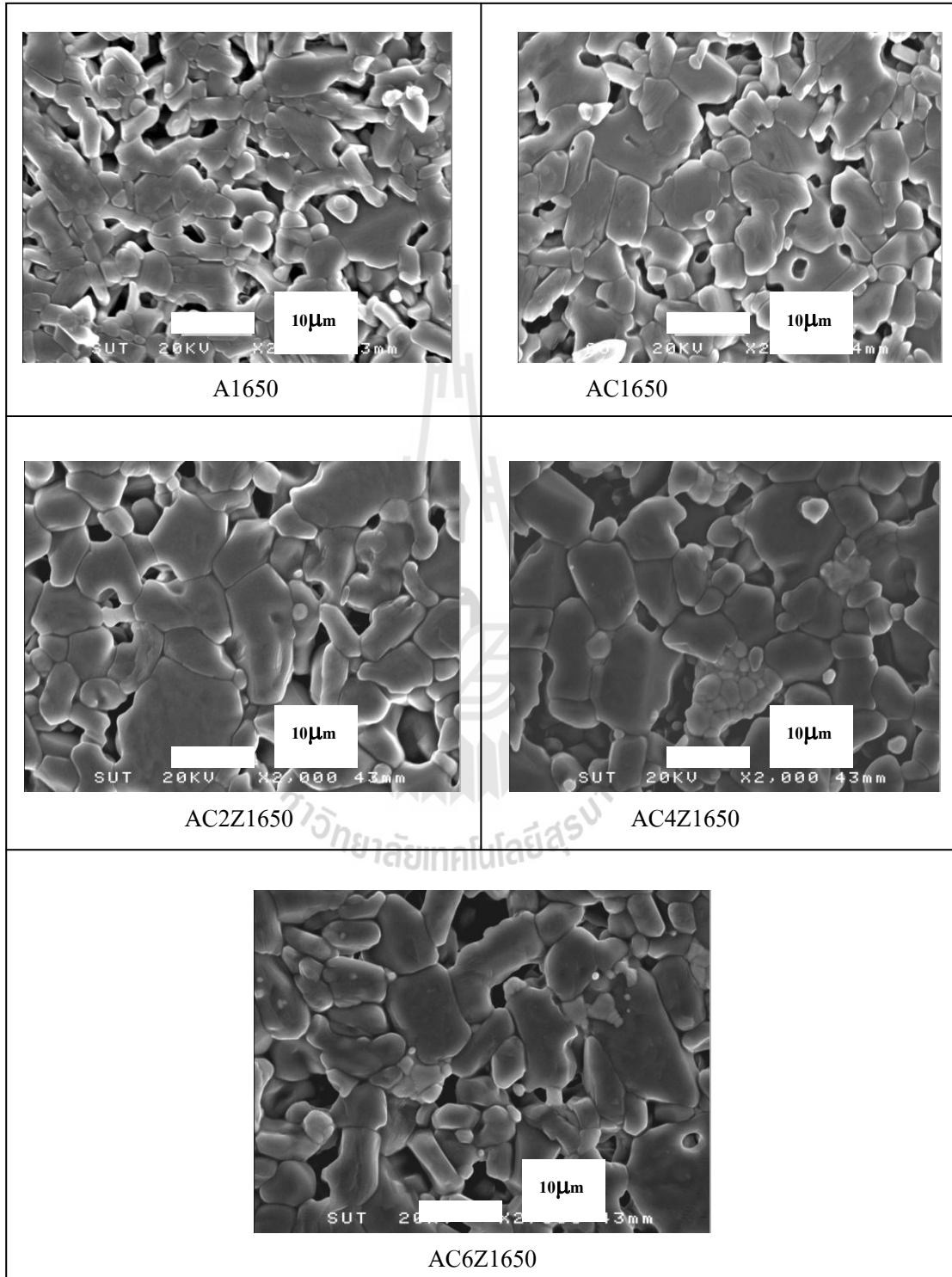
หมายเหตุ: \* เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
จำนวน 100 เกรน



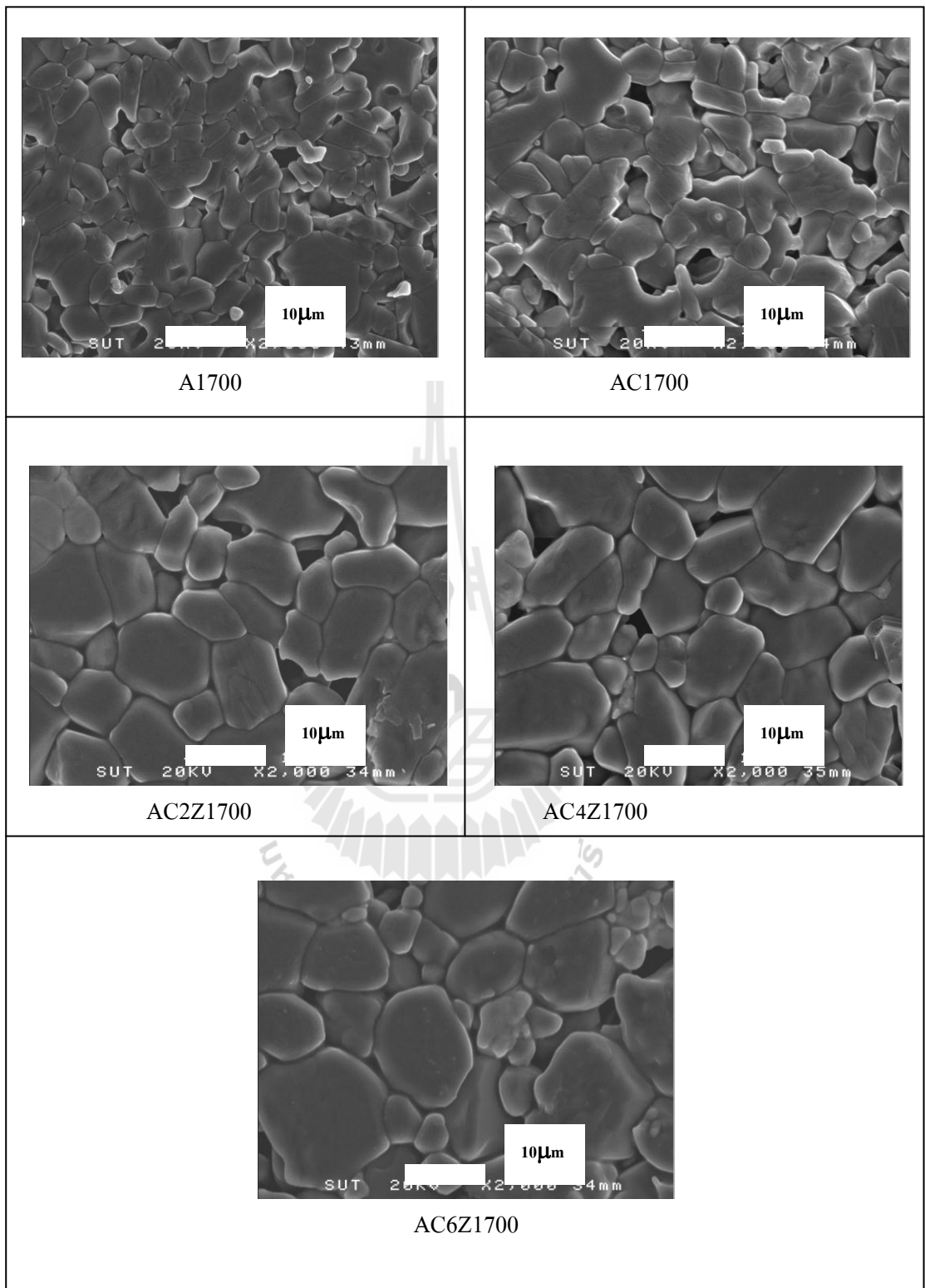
รูปที่ 4.20 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการศึกษาผลของสารเติมแต่งสมบัติที่มีต่อขนาดเกรน ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.20 พบว่า โครเมียมที่เติมเข้าไปส่งผลให้ขนาดเกรนเฉลี่ยของอะลูมินาเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจาก Cr ions ที่อยู่บริเวณ Grain Boundary และเชื่อว่า Cr ions จะทำให้เกรนเติบโตอย่างรวดเร็ว (Doh-Hyung Riu et al., 2000) ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนียในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก นั้นจะทำให้เกรนโตขึ้นตามปริมาณ 4Y เซอร์โคเนียที่เติมเข้าไปและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาก็พบว่าเกรนจะโตขึ้นตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

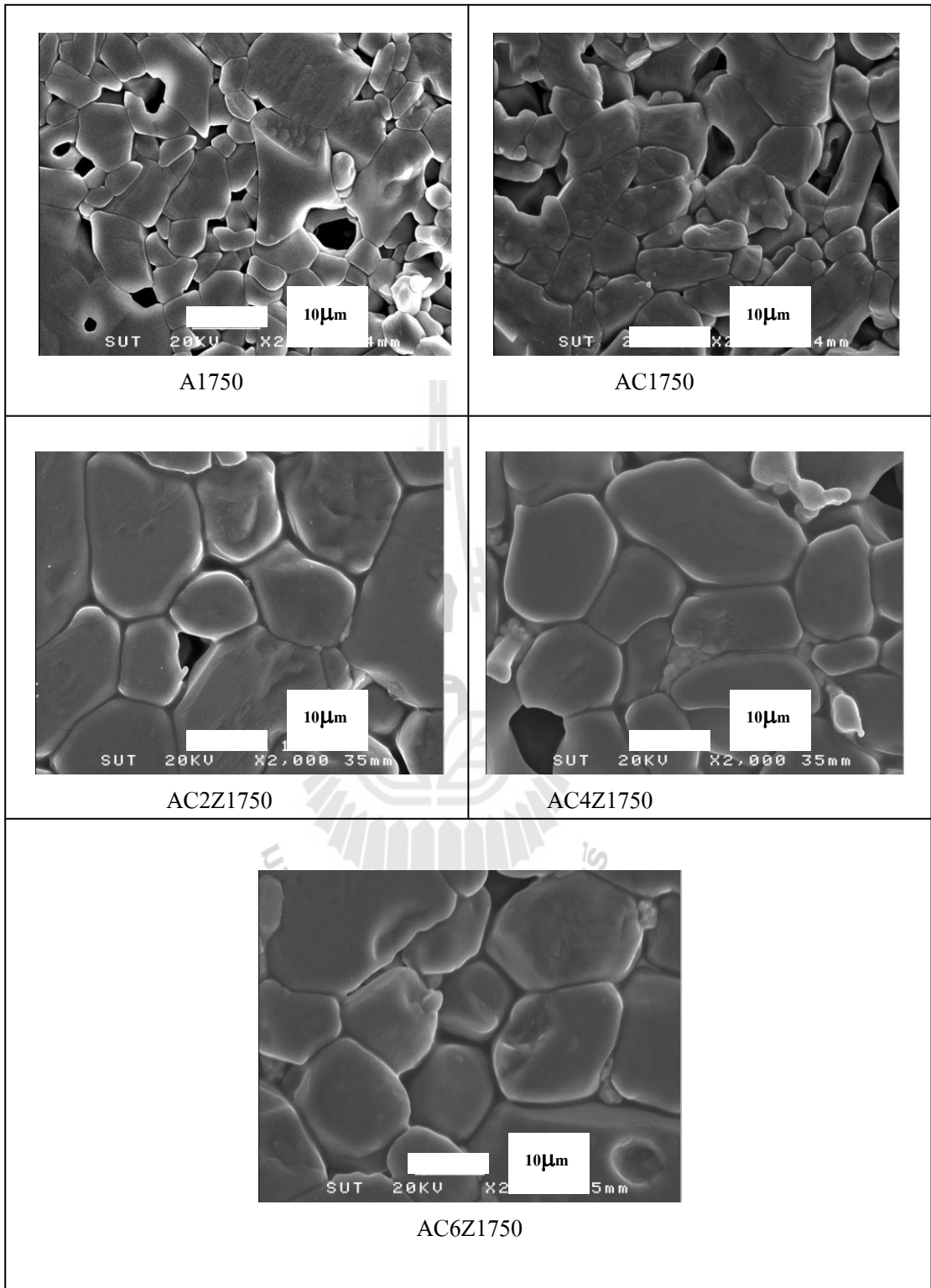
#### 4.2.4 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 4.21 แสดง โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1650°C



รูปที่ 4.22 แสดง โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1700°C



รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1750°C

เมื่อศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อ โครงสร้างจุลภาคของแต่ละตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.21-4.23) พบว่า ตัวอย่างที่เติมโครเมียมเข้าไปจะมีขนาดของเกรนที่โตขึ้นซึ่งสาเหตุเกิดจากการที่มี Cr ions จำนวนมากที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบเกรนของอะลูมินากับโครเมียม ซึ่ง Cr ions นั้นจะส่งผลให้เกรนมีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็ว และบริเวณขอบเกรนมีลักษณะไม่พอดีกัน (Doh Hyung Riu et al., 2000) (ตามคำอธิบายในหัวข้อที่ 4.2.3) และเมื่อปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เกรนมีขนาดโตขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผลาญ พบว่าขนาดของเกรนจะโตขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับ ค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนดังตารางที่ 4.4 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามอุณหภูมิเผาผลาญ



**4.2.5 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการตัดโค้ง ความเหนียว ความแข็ง และ ความเปราะ**

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการตัดโค้ง ความเหนียว ความแข็ง และความเปราะของตัวอย่างที่ได้จากงานวิจัยแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้ง ความเหนียว ความแข็ง และความเปราะ ของวัสดุเชิงประกอบของแต่ละตัวอย่าง ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 90 นาที

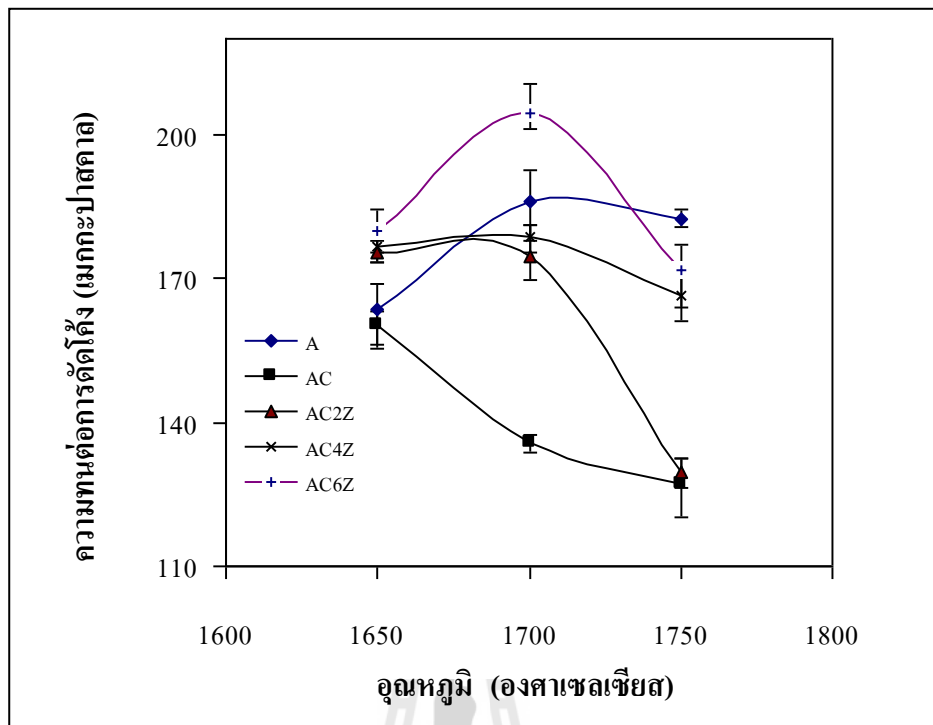
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สูตร	ความทนต่อการตัด โค้ง (เมกกะปาสคาล)	ความเหนียว (เมกกะปาสคาล× เมตร <sup>0.5</sup> )	ความแข็งวิก เกอร์ (จิกกะปาสคาล)	ความเปราะ** x10 <sup>6</sup> (1/เมตร)
1650	A	163.4 ± 5.78	3.03 ± 0.42	7.25 ± 0.08	58.03 ± 1.28
	AC	160.32 ± 3.09	3.24 ± 0.15	8.46 ± 0.05	66.83 ± 0.57
	AC2Z	175.27 ± 1.96	3.40 ± 0.22	6.69 ± 0.15	46.4 ± 0.99
	AC4Z	176.46 ± 2.45	3.75 ± 0.17	5.79 ± 0.03	36.03 ± 0.33
	AC6Z	180.11 ± 3.59	4.03 ± 0.13	5.74 ± 0.05	30.0 ± 0.49
1700	A	186.12 ± 6.12	3.33 ± 0.33	8.09 ± 0.12	54.63 ± 1.64
	AC	135.58 ± 1.65	3.42 ± 0.29	8.69 ± 0.05	58.17 ± 0.57
	AC2Z	174.67 ± 4.72	3.48 ± 0.15	7.95 ± 0.04	53.63 ± 0.6
	AC4Z	178.53 ± 2.43	4.25 ± 0.21	7.56 ± 0.07	45.93 ± 0.7
	AC6Z	204.64 ± 4.12	5.60 ± 0.26	7.18 ± 0.05	24.07 ± 0.24
1750	A	182.32 ± 1.47	2.92 ± 0.37	8.12 ± 0.08	38.9 ± 0.48
	AC	127.23 ± 4.83	3.86 ± 0.31	8.62 ± 0.14	41.9 ± 0.96
	AC2Z	129.51 ± 2.50	4.02 ± 0.20	7.23 ± 0.07	31.77 ± 0.57
	AC4Z	166.48 ± 3.40	4.53 ± 0.33	6.67 ± 0.05	26.53 ± 0.52
	AC6Z	171.79 ± 5.44	6.35 ± 0.34	6.23 ± 0.04	13.33 ± 0.21

หมายเหตุ: \* ความเหนียวคำนวณจากสมการที่ (3-5) หน้า 35

\*\* ความเปราะคำนวณจากสมการที่ (3-6) หน้า 38

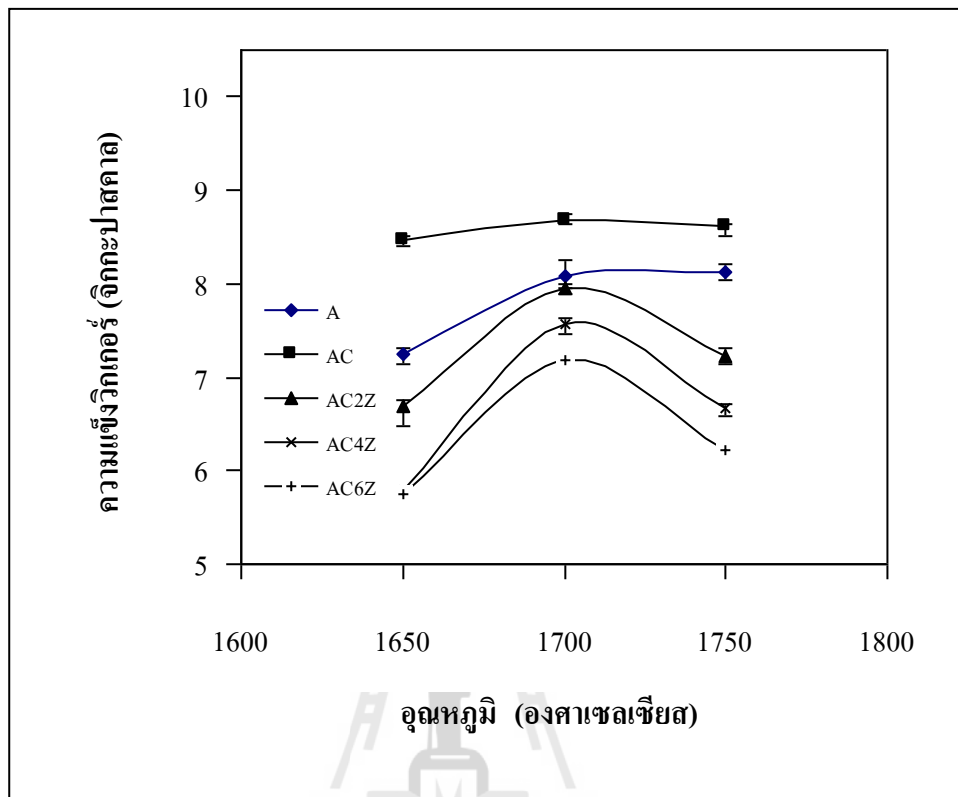
ตัวอย่างทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง





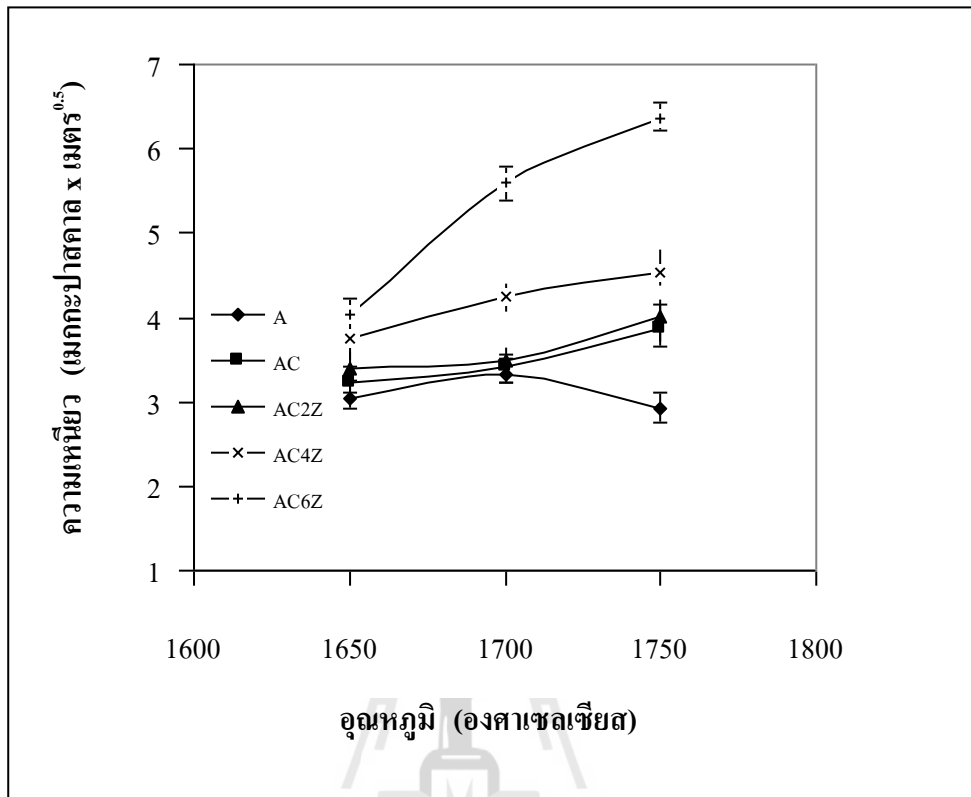
รูปที่ 4.24 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.24 เมื่อเติมโครเมียมเข้าไปในอะลูมินา พบว่าค่าความทนต่อการดัดโค้งของอะลูมินาลดลงสาเหตุเกิดจากขนาดของเกรนที่โตขึ้น (K.Shibata et al., 1997) และบริเวณขอบเกรนไม่พอดีกัน (Doh Hyung Riu et al., 2000) ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายตามรูปที่ 4.21-4.23 และการเติมโครเมียมนี้มีผลให้อุณหภูมิการเผาผนึกของอะลูมินาสูงขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในอะลูมินาเพิ่มมากขึ้น ดังเหตุผลที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ซึ่งปริมาณรูพรุนที่เพิ่มนี้เป็นสาเหตุให้ความทนต่อการดัดโค้งของอะลูมินาลดลง ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนีย ในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณ 4Y เซอร์โคเนียมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทนต่อการดัดโค้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุเกิดจาก 4Y เซอร์โคเนียจะช่วยลดปริมาณรูพรุนของวัสดุลง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้นและเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาผนึกมากกว่า 1700°C เนื่องจากขนาดของเกรนที่โตขึ้น ซึ่งตัวอย่าง AC6Z1700 จะมีค่าความทนต่อการดัดโค้งสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ  $204.64 \pm 4.12$  MPa



รูปที่ 4.25 แสดงค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

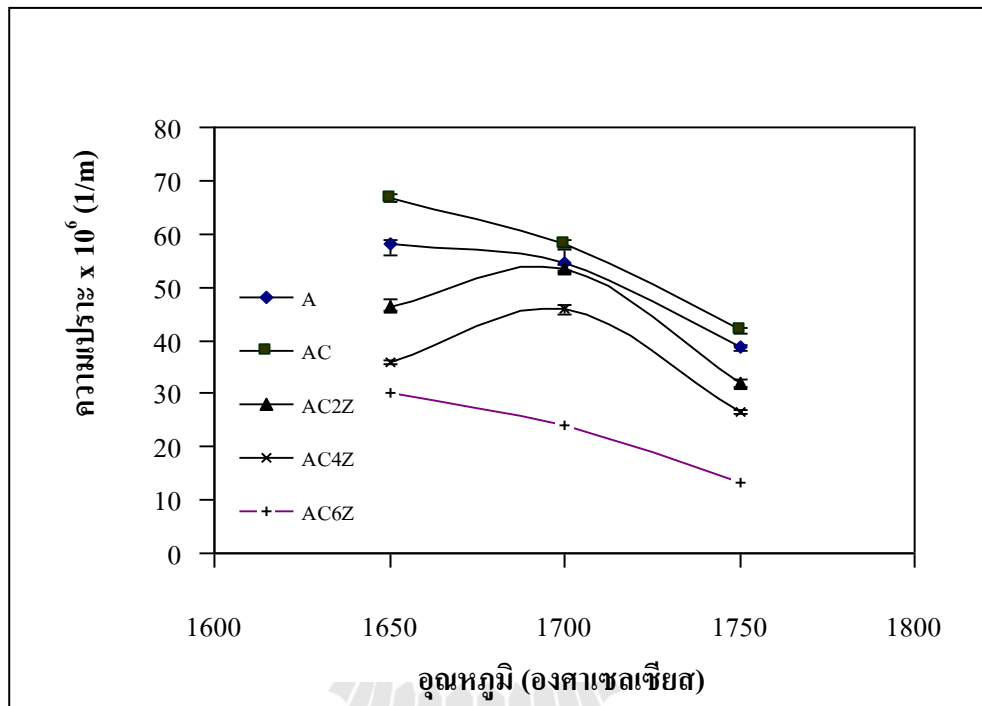
ส่วนการศึกษาค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.25 พบว่า โครเมียที่เติมเข้าไปจะช่วยให้อะลูมินามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายตามรูปที่ 4.21-4.23 (ในหัวข้อที่ 4.2.4) ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนียในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เข้าไปนั้นยิ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุลดลงตามปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎ Rule of Mixture ของ (Y.Takano et al., 1998) ที่ได้อธิบายไว้ว่าวัสดุจะมีความแข็งแรงที่ดีได้นั้นจะขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งที่ใช้ หากสารเติมแต่งที่ใช้มีปริมาณของวัฏภาคที่มีความแข็งแรงที่สูงในปริมาณมากก็จะส่งผลให้วัสดุที่ได้นั้นมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น โดยค่าความแข็งแรงของ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  มีค่าประมาณ 23 GPa ส่วน  $\text{ZrO}_2$  มีค่าประมาณ 9.4 GPa



รูปที่ 4.26 แสดงค่าความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.26 การเติม โครเมียเข้าไปในอะลูมินาพบว่าจะทำให้ค่าความเหนียวของอะลูมินาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สาเหตุเกิดจากเกรนที่โตขึ้น (K.Shibata et al., 1997) และเหตุผลอีกประการคือ ในวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่จะสามารถยับยั้งการวิ่งของรอยร้าว (Crack Propagation) ได้ดีกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก (Doh Hyung Riu et al., 2000) จึงเป็นผลให้วัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่มีความเหนียวมากกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก และโครเมียนั้นจะมีส่วนที่ช่วยในการเพิ่มปริมาณรูพรุนในอะลูมินา (ตามคำอธิบายในหัวข้อที่ 4.2.1) ซึ่งปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวจะช่วยในการดูดซับพลังงานจากรอยร้าว และเมื่อเติม 4Y เซอร์โคเนียในปริมาณร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนักเข้าไป พบว่าค่าความเหนียวของอะลูมินา-โครเมียเซรามิกจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม 4Y เซอร์โคเนียในวัสดุจะส่งผลให้เกิดวัฏภาคของ  $t\text{-ZrO}_2$  ขึ้นภายในวัสดุ ซึ่งวัฏภาคดังกล่าวมีผลในการช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุ โดยกระบวนการการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคจาก  $t\text{-ZrO}_2$  ไปเป็น  $m\text{-ZrO}_2$  ( Stress Induces Phase

Transformation) ของ (Y.Takano et al., 1998) จึงเป็นสาเหตุทำให้วัสดุที่เติม 4Y เซอร์โคเนียมีค่าความเหนียวที่สูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิในการเผาขึ้นค่าความเหนียวของวัสดุจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยค่าความเหนียวที่สูงที่สุดได้แก่ ตัวอย่าง AC6Z1750 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $6.35 \pm 0.34 \text{ MPa.m}^{0.5}$



รูปที่ 4.27 แสดงค่าความเปราะของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผานึ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าการเติมโครเมียเข้าไปในอะลูมินาส่งผลให้มีความเปราะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครเมียมีผลทำให้ค่าความแข็งของอะลูมินาเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติม 4Y เซอร์โคเนีย เข้าไปในอะลูมินา-โครเมียเซรามิก พบว่ามีค่าความเปราะจะลดลงตามปริมาณของ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก 4Y เซอร์โคเนียมีผลทำให้ค่าความแข็งลดลงและมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ J.B.Quinn ที่ได้อธิบายไว้ว่า วัสดุที่มีค่าความแข็งสูงจะมีความต้านทานการเปลี่ยนรูป (Deformation) ที่สูง เมื่อมีแรงมากระทำจึงทำให้วัสดุมีความเข้มข้นของความเค้นสะสม (Stress Concentration) มากจึงทำให้เกิดรอยแตกขึ้นภายในวัสดุ วัสดุจึงมีค่าความเปราะสูง ในขณะที่วัสดุที่มีค่าความแข็งต่ำและมีค่าความเหนียวสูง วัสดุจะมี Fracture Surface Energy ที่สูง สามารถเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่อมีแรง

มากระทำ ทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นสะสมต่ำในบริเวณที่มีแรงกระทำ วัสดุจึงมีค่าความเปราะน้อยหรือมีความเหนียวสูงนั่นเอง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึกจะส่งผลให้ค่าความเปราะมีค่าลดลง (J.B.Quinn, 1997)

#### 4.2.6 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความต้านทานการเจาะทะลุ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเติมแต่งต่อความต้านทานการเจาะทะลุ ของแต่ละตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

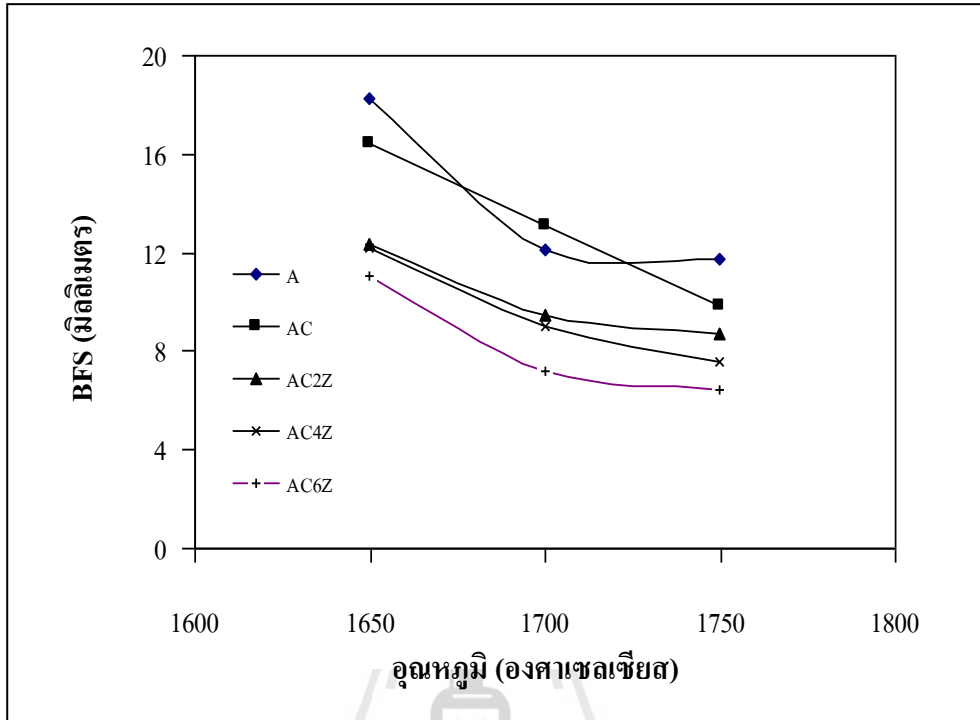
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานการเจาะทะลุและระยะโป่งหลัง (BFS)\* ของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 90 นาที

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สูตร	Back Face Signature** (BFS, มิลลิเมตร)	ความต้านทานการเจาะทะลุ***
1650	A	18.22	ไม่ทะลุ
	AC	16.44	ไม่ทะลุ
	AC2Z	12.38	ไม่ทะลุ
	AC4Z	12.22	ไม่ทะลุ
	AC6Z	11.04	ไม่ทะลุ
1700	A	12.12	ไม่ทะลุ
	AC	13.1	ไม่ทะลุ
	AC2Z	9.5	ไม่ทะลุ
	AC4Z	9.02	ไม่ทะลุ
	AC6Z	7.16	ไม่ทะลุ
1750	A	11.78	ไม่ทะลุ
	AC	9.86	ไม่ทะลุ
	AC2Z	8.68	ไม่ทะลุ
	AC4Z	7.54	ไม่ทะลุ
	AC6Z	6.42	ไม่ทะลุ

หมายเหตุ: \* ทดสอบและวัดค่าตามมาตรฐาน NIJ ด้วยความร่วมมือกับศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ

\*\* วิธีวัดแสดงในหน้า 37-38

\*\*\* วิธีวัดแสดงในหน้า 37



รูปที่ 4.28 แสดงค่า BFS ของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าการเติมโครเมียมเข้าไปในอะลูมินาส่งผลให้มีค่า BFS ที่เพิ่มขึ้นและเริ่มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกในขณะที่เมื่อเติม 4Y เซอร์โคเนียเข้าไปในอะลูมินา-โครเมียมเซรามิก พบว่าค่า BFS ลดลงตามปริมาณ 4Y เซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึกจะส่งผลให้ BFS มีค่าที่ลดลง เนื่องจากวัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้น และทุกตัวอย่างไม่มีรอยทะเล ซึ่งทั้งหมดนี้จะสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.5 และทั้งหมดมีค่า BFS น้อยกว่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน NIU ที่ 44 มิลลิเมตร

#### 4.3 ผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุ

ผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบ จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 พบว่าวัสดุเชิงประกอบซึ่งประกอบด้วยอะลูมินาร้อยละ 91 โดยน้ำหนัก โครเมียร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และ 4Y เซอร์โคเนียร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1700°C จะมี

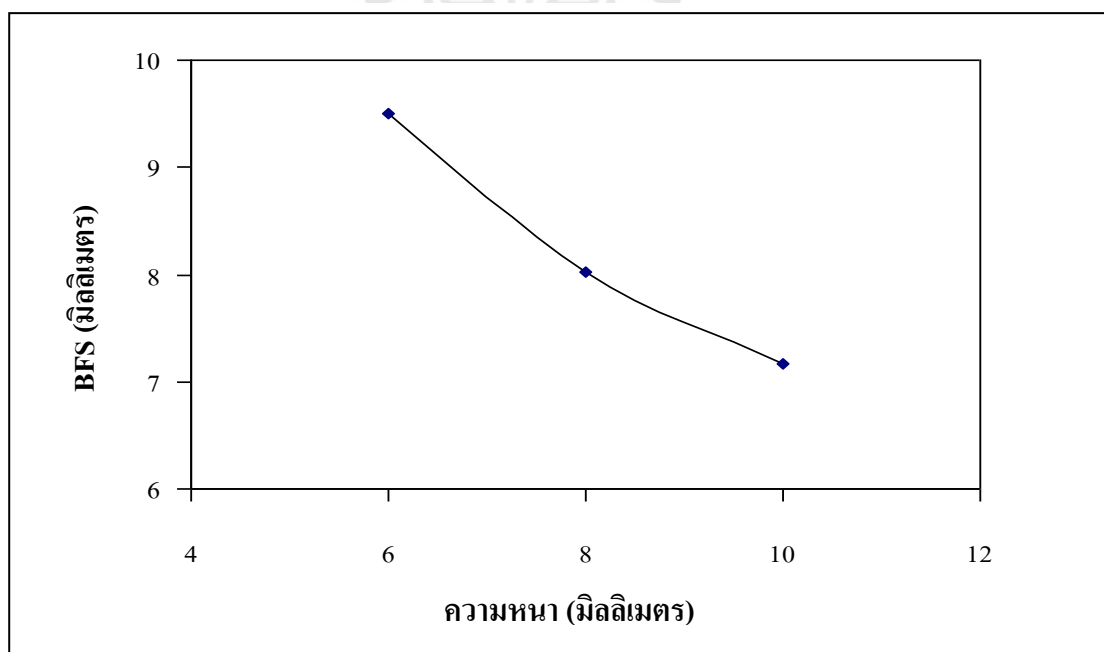
สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ดังนั้นในการศึกษาผลของความหนาต่อความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุเชิงประกอบ จึงได้เลือกวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมดังกล่าวข้างต้นมาทำการศึกษา โดยตัวอย่างมีความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อความต้านทานการเจาะทะลุ ของแต่ละตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของความหนาที่มีต่อความต้านทานการเจาะทะลุและระยะไป่งหลัง (BFS)\* ของตัวอย่างสูตร AC6Z1700

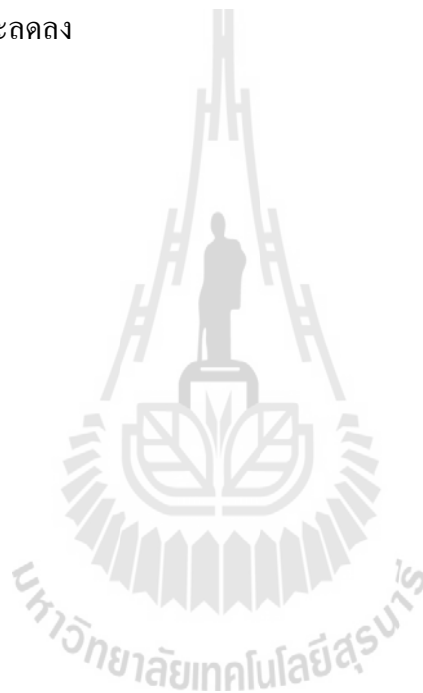
ความหนา (มิลลิเมตร)	Back Face Signature (BFS, มิลลิเมตร)	ความต้านทานการเจาะทะลุ
10	7.16	ไม่ทะลุ
8	8.02	ไม่ทะลุ
6	9.50	ไม่ทะลุ

หมายเหตุ: \* ทดสอบและวัดค่าตามมาตรฐาน NIJ ด้วยความร่วมมือกับศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ



รูปที่ 4.29 แสดงค่า BFS ของตัวอย่างสูตร AC6Z1700 ที่มีความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่แตกต่างกัน

โดยปกติแล้ววัสดุเซรามิกเมื่อมีแรงกระทำจะมี New Surface หรือรอยแตกเกิดขึ้นทำให้ความเค้นลดลงได้ ในขณะที่เดียวกันวัสดุก็จะมี ความต้านทานต่อแรงกระทำลดลง เนื่องจากมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งผลกระทบอันนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันความต้านทานการเจาะทะลุลดลง ดังนั้นการเพิ่มความหนาของวัสดุจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความต้านทานการเจาะทะลุได้ และความหนาที่เพิ่มขึ้นยังสามารถช่วยดูดซับ (Absorption) แรงที่มากกระทำได้มากขึ้น (Vemuri Madhu et al., 2005) ซึ่งจากตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีความหนาเพิ่มขึ้นในขณะที่ยังค่า BFS จะลดลง





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของปริมาณของสารเติมแต่งสมบัติ และภาวะตัวแปรที่ใช้ในการเผาผนึกของวัสดุเชิงประกอบนั้น ในการทดลองพบว่าสามารถทำให้ชิ้นงานที่ผลิตได้มีสมบัติหลายด้านที่ดีขึ้น โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เมื่อปริมาณรพูนภายในชิ้นงานลดลงวัสดุจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนียวจะลดลง เนื่องจากความสามารถในการดูดซับพลังงานจากรอยร้าวลดลง
2. วัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก จะมีความแข็งแรงที่สูงกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่ แต่ความเหนียวของวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็กจะมีค่าที่น้อยกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่ เนื่องจากเกรนขนาดใหญ่จะเกิดการหักเหของรอยร้าวมากกว่าเกรนขนาดเล็ก
3. การเติมโครเมียร์้อยละ 3 โดยน้ำหนักเข้าไปในอะลูมินามีผลให้ความแข็งแรง และความเหนียวของอะลูมินาเพิ่มขึ้น โดยการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C จะมีสมบัติที่ดีที่สุด
4. การเติมสารเติมแต่งเซอร์โคเนียในอะลูมินา-โครเมียร์ามีผลทำให้ความแข็งแรงของอะลูมินา-โครเมียร์ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุดจะมีปริมาณเซอร์โคเนียร์้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1700°C ส่วนความเหนียวของอะลูมินา-โครเมียร์ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซอร์โคเนียที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความเหนียวที่สูงที่สุดจะได้จากตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C
5. เมื่อเติมโครเมียร์้อยละ 3 เข้าไปในอะลูมินา และการเติมเซอร์โคเนียเข้าไปในอะลูมินา-โครเมียร์ามีผลพบว่ามีความต้านทานการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึกก็พบว่าความต้านทานการเจาะทะลุมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น และมีความเปราะลดลง
6. การลดความหนาของวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้มีความต้านทานการเจาะทะลุลดลง เนื่องจากความหนาที่ลดลงวัสดุเชิงประกอบจะมีสามารถในการดูดซับแรงที่มากกระทำได้น้อยลง

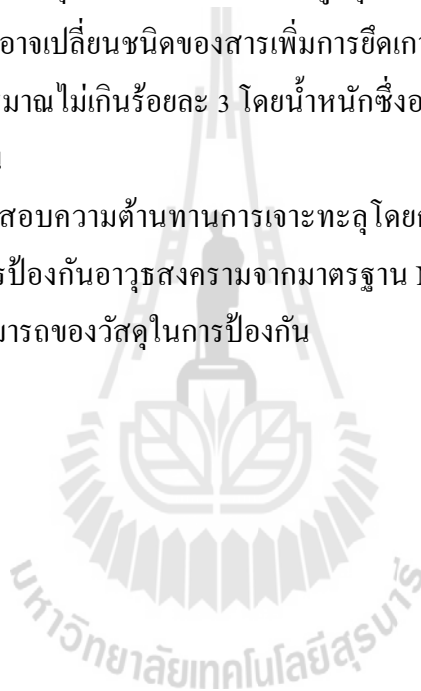
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและทดลองนี้สามารถปรับปรุงและพัฒนาขั้นต่อไปได้ดังนี้

1. การทดลองควรมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโครเมียให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความแข็งแรงและความเหนียวซึ่งจากเดิมเติมโครเมียในปริมาณคงที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

2. การลดปริมาณและเปลี่ยนตัวสารเพิ่มการยึดเกาะ ซึ่งจากเดิมใช้แป้งมันในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ควรมีการลดปริมาณลง หากสารเพิ่มยึดเกาะมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีปริมาตรรูพรุนมาก ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกลลดลง หรืออาจเปลี่ยนชนิดของสารเพิ่มการยึดเกาะ ซึ่งจากเดิมใช้แป้งมันอาจเปลี่ยนมาใช้ PVA ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนักซึ่งอาจส่งผลให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

3. การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุโดยการยิง ควรมีการทดลองเพิ่มระดับความสามารถป้องกันอาวุธสงครามจากมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 เป็น NIJ ระดับ 4 เพื่อทดสอบความสามารถของวัสดุในการป้องกัน

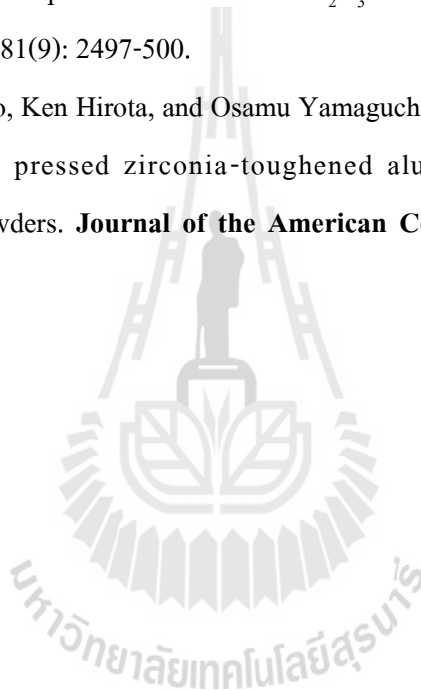


## เอกสารอ้างอิง

- [1.] จิตติ รินเสนา. (2552). **การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [2.] ปรีดา พิมพ์ขาว. (2539). **เซรามิกส์**. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3.] อนุรัตน์ ภูวานคำ. (2548). **การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-มุลไลท์-เซอร์โคเนีย สำหรับงานทางวิศวกรรม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4.] American Society for Testing and Material (ASTM). (1991). Standard Test Method for Water Absorption, Bulk density, Apparent Porosity, and Specific Gravity for Fired Whiteware Products. **ASTM C 373-88**. New York: ASTM.
- [5.] American Society for Testing and Material (ASTM). (1996). Standard Test Method for Flexural Strength of Advance Ceramic at Ambient Temperature. **ASTM C1161-90**. New York: ASTM.
- [6.] Anstis, G.P., Chantikul, P., Lawn, B.R., and Marshall, D.B. (1981). A Critical evolution of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, direct crack measurements. **Journal of American Ceramic Society**. 64: 533-538.
- [7.] Casellas, D., Rafols, I., Llanes, L., Anglada, M. (1999). Fracture toughness of zirconia-alumina composites. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**. 17: 11-20.
- [8.] Choi, S.R., and Bansal, N.P. (2005). Mechanical behavior of zirconia/alumina composites. **Ceramics International**. 31: 39-46.
- [9.] Doh-Hyung Rin, Young-Min Kong, and Hyoun-Ee Kim. (2000). Effect of  $Cr_2O_3$  addition on microstructural evolution and mechanical properties of  $Al_2O_3$ . **Journal of the European Ceramic Society**. 20: 1475-1481.
- [10.] Eugene Medvedovski. (2005). **Ceramic armor and armor system II**. (Vols 178). Maryland The American Ceramic Society.

- [11.] Eugene Medvedovski. (2006). Alumina-mullite ceramic for structural applications. **Ceramic International**. 32: 369-375.
- [12.] Hernandez, M.T., Gonzalez, M., and De Pablo, A. (2003). C-diffusion during hot press in the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  system. **Acta Materialia**. 51: 217-228.
- [13.] Lange, F.F. (1983). Processing-related fracture origins: Observation in sintered and isostatically hot-pressed  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  composites. **Journal of the American Ceramic Society**. Vol.66 No.6: 396-398.
- [14.] Michael F Ashby, and David R H Jones. (1986). **Engineering materials 1 an introduction to their properties and application**. (Volume 34). International Series on Materials Science and Technology.
- [15.] Michael V. Swain. (1994). **Materials science and technology structure and properties of ceramic**. (volume 11). Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH.
- [16.] Quinn, J.B., Quinn, G.D. (1997). Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach. **Journal of Materials Science**. 32: 4331-4346.
- [17.] Rao, P.G., Iwasa, M., Tanaka, T., Kondoh, I., and Inoue, T. (2003). Preparation and mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-15wt.\%ZrO}_2$  composites. **Scripta Materialia**. 48: 437-441.
- [18.] Shibata, K., Yoshinaka, M., Hirota, K., and Yamaguchi, O. (1997). Fabrication and mechanical properties of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  solid solution ceramics in the system  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ . **Materials Research Bulletin**. Vol.32 No.5: 627-632.
- [19.] Stevens, R. (1986). **Zirconia and zirconia ceramics**. Magnesium Elektron: 26-30.
- [20.] Soon-Kil Chung. (1990). Fracture characterization of armor ceramics. (1990). **American Ceramic Society Bulletin**. Vol 69(3): 358-66.
- [21.] Takehiko Hirata, Katsunori Akiyama, and Hirokazu Yamamoto. (2000). Sintering behavior of  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  ceramic. **Journal of the European Ceramic Society**. 20: 195-199.
- [22.] Tuan, W.H., Chen, R.Z., Wang, T.C., Cheng, C.H., and Kuo, P.S. (2002). Mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  composites. **Journal of the European Ceramic Society**. 22 : 2827-2833.

- [23.] Vemuri Madhu, Ramanjaneyulu, K., Balakrishna Bhat, T., Gupta, N.K. (2005). An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. **International Journal of Impact Engineering**. 32: 337-350.
- [24.] William F. Smith. (1996). **Principle of Material Science and Engineering**. 3<sup>rd</sup>.ed. New York: McGraw-Hill.
- [25.] Yodhihiko Takano, Tetsuya Komeda, Masaru Yoshinaka, Ken Hirota, and Osamu Yamaguchi. (1998). Fabrication, microstructure, and mechanical properties of  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(2.5\text{Y})$  composite ceramics in the  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - rich region. **Journal of the American Ceramic Society**. 81(9): 2497-500.
- [26.] Yosuke Matsumoto, Ken Hirota, and Osamu Yamaguchi. (1993). Mechanical properties of hot isostatically pressed zirconia-toughened alumina ceramics prepared from coprecipitated powders. **Journal of the American Ceramic Society**. 76(10): 2677-80.



## ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ(ภาษาไทย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล  
(ภาษาอังกฤษ) Assist. Prof. Dr.Sukasem Kangwantrakool
- รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ 42500056
- เลขหมายประจำตัวประชาชน 3-3099-00294-82-5
- ตำแหน่งปัจจุบัน หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
- ที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000  
โทรศัพท์ 0-4422-4471 โทรสาร 0-4422-4612  
โทรศัพท์มือถือ 089-845-0557 E-mail: [sukasemk@yahoo.com](mailto:sukasemk@yahoo.com)

### 6. ประวัติการศึกษา

ปีที่สำเร็จการศึกษา	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันการศึกษา	ประเทศ
2546	ปริญญาเอก	D.Eng.	วิศวกรรมวัสดุศาสตร์	Hokkaido University	ญี่ปุ่น
2540	ปริญญาโท	วทม.	เทคโนโลยีเซรามิก	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ไทย
2537	ปริญญาตรี	วทบ.	เทคโนโลยีการผลิต	สถาบันราชภัฏพระนคร กรุงเทพฯ	ไทย

### 7. สาขาวิชาที่เชี่ยวชาญ

- วัสดุโลหะ และ เซรามิกพื้นฐาน
- กระบวนการขึ้นรูปวัสดุเซรามิกขั้นสูง
- เซรามิกชีวภาพ(ศัลยกรรมวัสดุ) ได้แก่ HA/HDPE composite
- วัสดุเซรามิกขั้นสูง ได้แก่  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , WC, TiC, SiC,  $Si_3N_4$  เป็นต้น
- วัสดุเชิงประกอบ ได้แก่  $Al_2O_3$ -TiC,  $Al_2O_3$ -SiC,  $Al_2O_3$ - $Al_2O_3$ , WC-Co composite เป็นต้น

## 8. ผลงานวิจัย

- **S. Kangwantrakool** and K. Shinohara; “Preparation of New WC-Co/TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Materials with Mechanically Coated Particles,” *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2001; 34(12):1486-1492.
- **S. Kangwantrakool** and K. Shinohara; “New Design of Microstructure of WC-Co/TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Materials by Mechanical Coating of Particles,” *Journal of the Japan Society Powder and Powder Metallurgy*, 2002; 49(12): 1070-1075.
- **S. Kangwantrakool** and K. Shinohara, “Hot Hardness of WC-Co/TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Materials,” *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2002; 35(9): 893-899.
- **S. Kangwantrakool**, B. Golman and K. Shinohara; “Quantitative Characterization of Microstructure of WC-Co/TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Materials with Relate to Mechanical Properties,” *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2003; 36(1): 49-56.
- **S. Kangwantrakool** and K. Shinohara; “Sintering Behavior of Mechanically Coated WC-Co/TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles by High-speed Rotational Impact Blending,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2003; 21: 171-182.
- J. Suwanprateeb, S. Tiemprateeb, **S. Kangwantrakool** and K. Hemachadra: The Role of Filler Volume Fraction in the Strain Rate Dependence of Calcium Carbonate Reinforced Polyethylene, *Journal of Applied Polymer Science*, 1998; 70: 1717-1724.

## 9. ผลงานวิชาการอื่น ๆ

- สุขเกษม กังวานตระกูล: Hot Isostatic Press (HIP) of Materials, Proceeding of Annual Meeting of the Thai Ceramic Society of Thailand, Bangkok (1994).
- สุขเกษม กังวานตระกูล; “Ceramic Cutting Tools: Part I”, วารสารเทคโนโลยีวัสดุ (MTEC), 2542; 16: 20-23.
- สุขเกษม กังวานตระกูล; “Ceramic Cutting Tools: Part II”, วารสารเทคโนโลยีวัสดุ (MTEC), 2542; 7: 60-64.
- **S. Kangwantrakool** and K. Shinohara; “Advanced Preparation of WC-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC Surface Composite Particles for Sintered Materials,” Proceeding of the First Asian Particle Technology Symposium (APT 2000), Bangkok, Thailand, CD-ROM, pp. S-II (2)-3#0076 (2000).

- **S. Kangwantrakool** and K. Shinohara; “Proper Composition of Coated Particles for New Cemented Carbide Material,” Proceeding of 34<sup>th</sup> Autumn Meeting of the Society of Chemical Engineering of Japan, Sapporo, CD-ROM, pp.R109(2001).
- **S. Kangwantrakool** and K. Shinohara; “Microstructure of WC-Co/TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Materials Prepared from Coated Particles by Rotational Impact Blending,” Proceeding of Annual Spring Meeting of the Powder Technology Society of Japan, Kyoto, pp.106 (2002).

