

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



191031

รหัสโครงการ SUT7-708-52-12-55



รายงานการวิจัย

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมีย  
ด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย

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

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

6 00 255552

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



191031

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

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552 ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสุรพงษ์ เพชรวัตร ผู้ช่วยวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆจนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และ พลอากาศตรีวีระศักดิ์ สิตานนท์ ผู้อำนวยการสำนักงานวิจัยศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ และเรืออากาศโทอนุชา ผลิกะ นายทหารคนสนิท รองผู้อำนวยการสำนักงานวิจัยศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ ที่สนับสนุนการทดสอบการยิงในงานวิจัย จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี



(ผศ.ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล)  
ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

191031

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบให้เหมาะสม สำหรับการใช้งานเป็นเกราะกันกระสุน การทดลองส่วนแรก ทำการศึกษาผลของเซอร์โคเนียที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอะลูมินา-โครเมียมเซรามิก และหาปริมาณของสารเติมแต่งและอุณหภูมิในการเผาผนึกที่เหมาะสม โดยนำผงอะลูมินามาบดผสมกับโครเมียมปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และใช้เซอร์โคเนียปริมาณร้อยละ 0-6 โดยน้ำหนัก เป็นสารเติมแต่ง ส่วนผสมจะถูกอัดแห้งและทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึก จะนำไปวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะ ได้แก่ ความหนาแน่น รูพรุน 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

191031

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,  $6.35 \pm 0.34$   $MPa \cdot m^{0.5}$ , 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 อิเทียมออกไซด์ (4Y)	21
3.3.1.2 การเตรียมผง Stabilize เซอร์โคเนียโดยใช้ 4%โมล อิเทียมออกไซด์ (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
4 ผลการทดลอง และ อภิปรายผล	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% โมลอิทธิเยมออกไซด์ (4Y)	52
4.1.4.1 การวิเคราะห์ทางวิภาคของผงเซอร์โคเนียที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ 4% โมลอิทธิเยมออกไซด์ (4Y)	52
4.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะ และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-โครเมีย/เซอร์โคเนีย หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลา 90 นาที	53
4.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน	53
4.2.2 ผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการเปลี่ยนแปลงวิภาค	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
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	หน้า	
2.1	แสดงผลสรุประดับทิศทางกลที่ได้จากการศึกษาระบบ $Al_2O_3-Cr_2O_3$ 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	แสดงลักษณะเฉพาะของผงโครเมียม	44
4.3	แสดงลักษณะเฉพาะของผงเซอร์โคเนีย	48
4.4	แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของวัสดุเชิงประกอบแต่ละตัวอย่าง	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%โมลอิตเทียมออกไซด์ (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	หน้า
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 ของผงโครเมีย	45
4.5 แสดงรูปไมโครกราฟของผงโครเมียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	46
4.6 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของโครเมีย	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	หน้า
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 4Yเซอริโคเนียร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	59
4.18 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Yเซอริโคเนียร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	60
4.19 แสดง XRD แพทเทิร์น ของชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย 4Yเซอริโคเนียร้อยละ 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