การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาซิลิกอนคาร์ไบด์โดยใช้ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์สังเคราะห์โดยวิธีการผสมแบบเชิงกล

นายหัสนัยน์ เหลืองธนารักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

FABRICATION OF Al_2O_3-SiC COMPOSITE USING SiC NANOPOWDER SYNTHESIZED BY MECHANICAL ALLOYING METHOD

Hussanai Luangthanarak

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาซิลิกอนคาร์ไบด์โดยใช้ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์สังเคราะห์โดยวิธีการผสมแบบเชิงกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____
(อ. ดร.วีระยุทธ์ ลอประยูร)
ประธานกรรมการ

_____
(ผศ. ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____
(รศ. ดร.สุทิน คูหาเรืองรอง)
กรรมการ

_____
(ผศ. ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก)
กรรมการ

_____
(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

_____
(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หัสนัยน์ เหลืองธนารักษ์ : การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาซิลิกอนคาร์ไบด์โดยใช้ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์สังเคราะห์โดยวิธีการผสมแบบเชิงกล (FABRICATION OF Al_2O_3-SiC COMPOSITE USING SiC NANOPOWDER SYNTHESIZED BY MECHANICAL ALLOYING METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขเกษม กังวานตระกูล, 159 หน้า.

การศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินาซิลิกอนคาร์ไบด์ (Al_2O_3-SiC composite) มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาด้าน ความแข็งแรง (strength) และความเหนียว (toughness) เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานทางด้านวิศวกรรม เช่น เครื่องมือตัดแต่งวัสดุ (cutting tools) วัสดุขัดถู (abrasive) ชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการสังเคราะห์ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยวิธีผสมแบบเชิงกลใช้ผงซิลิกอน (Si) และผงคาร์บอน (C) ที่อยู่ในรูปของแกรไฟต์เป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยตัวอย่างที่ผ่านการผสมแบบเชิงกลจะนำไปทำการให้ความร้อน (annealing) ที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 2 เป็นการนำเอาผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในส่วนที่ 1 มาผสมกับอะลูมินาเนื้อหลักโดยใช้ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงในปริมาณที่ต่างกันและนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการเผาผนึกแบบฝังกลบ แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกไปวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะได้แก่ วัฏภาค โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่นและทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็ง ความแข็งแรง และความเหนียว

ผลการทดสอบเชิงกลพบว่าความทนต่อการดัดโค้ง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 426.8 MPa ซึ่งได้จากชิ้นงานที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ร้อยละ 15 โดยปริมาตรที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C และค่าความเหนียวสูงสุดเท่ากับ 3.8 $MPa.m^{0.5}$ จะได้จากชิ้นงานที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตร โดยผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750 °C

สาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2553 ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา_____

HASSANAI LUANGTHANARAK : FABRICATION OF Al_2O_3-SiC COMPOSITE USING SiC NANOPOWDER SYNTHESIZED BY MECHANICAL ALLOYING METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUKASEM KANGWANTRAKOOL, D.Eng., 159 PP.

ALUMINA/SILICON CARBIDE/NANOCOMPOSITE

The properties of Al_2O_3-SiC composites were investigated, such as strength and toughness for the optimized engineering applications, such as cutting tools, abrasive tools, and engine parts. There were 2 parts of the experiment. The first part was to study the synthesis of nano-sized SiC powder from silicon and graphite powder by mechanical alloying. Synthesized SiC nanopowder was annealed at 1350°C. In the second part of the experiment, synthesized SiC nanopowder obtained in the first part of the experiment was reinforced in Al_2O_3 matrix with different amount and sintered by embedding method. Sintered composites were characterized on the phase, microstructure and density. The mechanical properties of sintered samples, such as hardness, flexural strength, and fracture toughness were measured.

The result showed that the highest flexural strength, 426.8 MPa, was obtained with 15 vol% SiC and sintering temperature at 1750°C. The maximum fracture toughness, 3.8 $MPa.m^{0.5}$, was obtained with 5 vol% SiC sintered at 1750°C.

School of Ceramic Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2010 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่านดังต่อไปนี้

คุณพ่อสมหวัง เหลืองธนารักษ์และคุณแม่วิไล เหลืองธนารักษ์ ผู้ให้การเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน ให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นผู้ที่คอยชื่นชมในความสำเร็จของผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่ให้คำปรึกษาและคอยแนะนำในสิ่งที่เป็นประโยชน์กับผู้วิจัย

อาจารย์ ดร.วีระยุทธ์ ลอประยูร และรองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร ผู้ให้คำแนะนำและคอยให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ กับผู้วิจัยทั้งเรื่องทางวิชาการและเรื่องส่วนตัว

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทิน คูหาเรืองรอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์ ผู้ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ผู้ที่คอยให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านงานเอกสารแก่ผู้วิจัย

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน่วยงานที่สนับสนุนเงินทุนใน การวิจัย

คุณกมล ไตรปัญญา คุณอุดร ทองเบ้า และคุณนัฐนิตย์ ป่วนปาน กลุ่มคนที่คอยดูแลและให้กำลังใจในการทำงานจนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายนี้ขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอยนามเช่น พี่ประจำศูนย์เครื่องมือต่าง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัย จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

หัสนัยน์ เหลืองธนารักษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฐ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 อะลูมินา 3
2.2 ซิลิกอนคาร์ไบด์ 5
2.2.1 การเตรียมเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ 6
2.2.1.1 เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่าง ซิลิกอนกับคาร์บอน 6
2.2.1.2 เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่าง ซิลิกากับคาร์บอน 6
2.2.1.3 เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาในสภาวะไอ 6
2.2.1.4 เตรียมโดยวิธีการระเหยของก๊าซ 7
2.2.1.5 เตรียมได้จากการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่เป็น Organosilicic polymers 7
2.2.2 การเตรียมแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ 7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3 การแบ่งผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ 8
2.2.3.1 ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย
การยึดติดกันเป็นรูปร่างด้วยตัวของมันเอง 8
2.2.3.2 ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย
การอัดโดยใช้ความร้อน 8
2.2.3.3 ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย
การยึดด้วยแกรไฟต์ 9
2.2.3.4 ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการยึดติด
กันโดยใช้ดิน 9
2.2.3.5 การยึดติดกันโดยสารประกอบซิลิเกต 9
2.2.3.6 ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย
การยึดติดกันโดยซิลิกอนไนไตรด์ 9
2.2.4 การเสื่อมสภาพของซิลิกอนคาร์ไบด์ 9
2.2.5 ผลิตภัณฑ์ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 10
2.3 การบดผสมแบบเชิงกล 13
2.3.1 ประวัติความเป็นมา 13
2.3.2 กระบวนการของการบดผสมแบบเชิงกล 17
2.3.2.1 วัตถุดิบ 17
2.3.2.2 การบด 18
2.3.2.3 ตัวแปรผันของกระบวนการ 21
2.3.3 กลไกการเกิดโลหะผสม 25
2.3.3.1 องค์ประกอบความเหนียว-ความเหนียว 28
2.3.3.2 องค์ประกอบความเหนียว-ความเปราะ 29
2.3.3.3 องค์ประกอบความเปราะ-ความเปราะ 30
2.4 วัสดุเชิงประกอบ 30
2.4.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต 31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 เซรามิกคอมโพสิต....32
2.4.3 เมทัลคอมโพสิต....32
2.4.4 การรับแรงของวัสดุ....32
2.4.4.1 แรงดึง....32
2.4.4.2 แรงกดอัด....33
2.4.4.3 แรงเฉือน....34
2.4.4.4 แรงดัด....34
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....35
3 วิธีดำเนินการวิจัย....38
3.1 อุปกรณ์การทดลอง....38
3.2 วัสดุและสารเคมี....39
3.2.1 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์....40
3.2.2 ผงซิลิกอน....40
3.2.3 ผงคาร์บอน....40
3.2.4 ผงอิธเทรียมออกไซด์....40
3.3 วิธีการทดลอง....40
3.3.1 การออกแบบการทดลอง....41
3.3.2 การเตรียมผงตัวอย่าง....45
3.3.3 การตรวจสอบ charge ratio ที่เหมาะสมของผงตัวอย่าง....47
3.3.4 การตรวจสอบเวลาที่เหมาะสมของผงตัวอย่าง....47
3.3.5 อุณหภูมิในการให้ความร้อน....48
3.3.6 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นและผงตัวอย่าง....56
3.3.6.1 การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงซิลิกอน อะลูมินา และคาร์บอน....50
3.3.6.2 การหาขนาดผลึกของสารตัวอย่าง....50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.6.3 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของผงซิลิกอน
คาร์บอน อะลูมินาและผงตัวอย่าง....51
3.3.6.4 การหาขนาดของผงตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
แบบส่องผ่าน....52
3.3.7 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ....52
3.3.7.1 การเตรียมผงตัวอย่างเสริมแรงในอะลูมินา....52
3.3.7.2 การผสมผงตัวอย่างกับอะลูมินา....54
3.3.8 การขึ้นรูปโดยการอัดแห้ง....55
3.3.9 การเผาผนึก....57
3.3.10 การทดสอบความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของตัวอย่าง....61
3.3.11 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง....62
3.3.11.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ....62
3.3.11.2 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง....62
3.3.12 ทดสอบความแข็งจุลภาค....64
3.3.13 การหาค่าความเหนียว....65
3.3.14 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตัวอย่างด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด....66
3.3.14.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค....66
3.3.14.2 การวัดขนาดเกรนของตัวอย่างด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด....67
3.3.14.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน....68
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล....75
4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น....75
4.1.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา....75
4.1.1.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงอะลูมินา....76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงอะลูมินา.....77
4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงคาร์บอน.....78
4.1.2.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงคาร์บอน.....79
4.1.2.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงคาร์บอน.....80
4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงซิลิกอน.....81
4.1.3.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงซิลิกอน.....82
4.1.3.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงซิลิกอน.....83
4.2 ผลของกระบวนการบดผสมแบบเชิงกลที่มีต่อการสังเคราะห์ผงซิลิกอนคาร์ไบด์หลังจากการบดที่เวลาต่าง ๆ กัน.....84
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางวัฏภาคของผงตัวอย่างหลังจากทำการบดที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้ชาร์ทเรโช 10:1 20:1 30:1 40:1 และ 50:1 ก่อนทำการ annealing.....84
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางวัฏภาคของผงตัวอย่าง หลังจากทำการบดที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้ชาร์ทเรโช 10:1 20:1 30:1 40:1 และ 50:1 หลังทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....85
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางวัฏภาคของผงตัวอย่างหลังจากทำการบดที่ระยะเวลา 1 2 3 4 5 6 8 และ 10 ชั่วโมง โดยใช้ชาร์ท เรโช 20:1 ก่อนทำการ annealing.....86
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางวัฏภาคของผงตัวอย่างหลังจากทำการบดที่ระยะเวลา 1 2 3 4 5 6 8 และ 10 ชั่วโมง โดยใช้ชาร์ทเรโช 20:1 หลังทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน.....87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.5 ผลของกระบวนการบดผสมแบบเชิงกลที่มีต่อขนาดผลึก (crystallite size) ของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่สังเคราะห์ได้ ที่เวลาการบด 5 ชั่วโมงหลังทำการ annealing 89
4.3 ผลของปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์หลังผ่านการเผาผนึกที่ อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง 91
4.3.1 วัฏภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่มีปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ร้อยละ 15 โดยปริมาตร เผาผนึกที่ 1750 องศาเซลเซียส 91
4.3.2 ผลของปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน 92
4.3.3 ผลของปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ แตกต่างกันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง 102
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 108
5.1 สรุปผลการวิจัย 108
5.2 ข้อเสนอแนะ 109
รายการอ้างอิง 110
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. XRD แพทเทิร์น อะลูมินา คาร์บอน ซิลิกอนและซิลิกอนคาร์ไบด์ 113
ภาคผนวก ข. ตารางการคำนวณ ชาร์ทเรโชที่อัตราส่วนต่างกัน ใช้เวลา การบดผสม 1 ชั่วโมง ชาร์ทเรโชที่อัตราส่วนเหมาะสม ใช้เวลาต่างกันและชาร์ทเรโชที่อัตราเหมาะสม กับเวลาที่เหมาะสม 118
ภาคผนวก ค. มาตราฐานการทดสอบ ASTM 126
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณ Modulus of rupture Hardness และ Toughness 144

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ. ตัวอย่างการคำนวณ Crystal size.....148
ภาคผนวก ฉ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....151
ประวัติผู้เขียน.....159

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อมูลของแต่ละเทคนิค 14
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 38
3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 39
3.3 อัตราส่วนผสมที่ใช้ charge ratio 10:1 20:1 30:1 40:1 และ 50:1 เวลาบด 1 ชั่วโมง 47
3.4 อัตราส่วนผสมที่ใช้เวลาบด 1 2 3 4 5 6 8 และ 10 ชั่วโมงใช้ charge ratio 20:1 48
3.5 ข้อมูลในการให้ความร้อน 49
3.6 charge ratio และเวลาที่เหมาะสม 52
3.7 ข้อมูลอัตราส่วนผสม 54
3.8 ข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ 58
3.9 ข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ 59
3.11 ข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ 60
4.1 ลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา 75
4.2 ลักษณะเฉพาะของผงคาร์บอน 78
4.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงซิลิกอน 81
4.4 ค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของวัสดุเชิงประกอบแต่ละตัวอย่าง 92
4.5 ค่าความทนต่อการดัดโค้ง ความเหนียว ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบของแต่ละตัวอย่าง ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 103
ก.1 แสดง XRD แพทเทิร์นของอะลูมินา 113
ก.2 แสดง XRD แพทเทิร์นของคาร์บอน 114
ก.3 แสดง XRD แพทเทิร์นของซิลิกอน 115
ก.4 แสดง XRD แพทเทิร์นของซิลิกอนคาร์ไบด์ 116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข.1 แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้ charge ratio 10:1 20:1 30:1 40:1 และ 50:1 เวลาบด 1 ชั่วโมง 118
ข.2 แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้เวลาบด 1 2 3 4 5 6 8 และ 10 ชั่วโมง ใช้ charge ratio 20:1 120
ข.3 ตารางของ charge ratio และเวลาที่เหมาะสม 123
ง.1 ข้อมูลขนาดของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1550°C 145
ง.2 ข้อมูลชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1550°C 146
ง.3 ข้อมูลชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1550°C 147
จ.1 ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม EVA เครื่อง XRD เพื่อหาค่า FWHM 150

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

รูปที่

2.1 โครงสร้างของอะลูมินา 3

2.2 โครงสร้างของซิลิกอนคาร์ไบด์ 11

2.3 แผนภูมิวัฏภาคของ SiC 12

2.4 พลังงานที่เกิดและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดวัสดุอุปเสถียร 13

2.5 เครื่องบดแบบเขย่า 18

2.6 เครื่อง Pulverisette5 19

2.7 เครื่องบดแบบแอตตริชัน 20

2.8 ปัจจัยการแปรผันของกระบวนการการบดผสมแบบเชิงกล 22

2.9 ผงที่ลูกบอลกระแทกในระหว่างการบดผสมแบบเชิงกล 26

2.10 เวลาระยะเวลาการบดที่มีผลต่อขนาดอนุภาคขนาดอนุภาค 27

2.11 เวลาการบดที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคเล็กลง 28

2.12 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการบดใน
องค์ประกอบแบบความเหนียว-ความเปราะ 29

2.13 วัสดุคอมโพสิต 31

2.14 วัสดุคอมโพสิตที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ 31

2.15 วัสดุคอมโพสิตที่ใช้ในงานก่อสร้าง 32

2.16 ทิศทางของแรงดึง (tension) 32

2.17 ทิศทางของแรงอัด (compression) 33

2.18 ทิศทางของแรงเฉือน (shear) 33

2.19 ทิศทางของแรงดัด (flexure) 34

2.20 คอมโพสิตชนิดต่าง ๆ และค่า tensile modulus 35

3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ charge ratio
10:1 20:1 30:1 40:1 และ 50:1 ใช้เวลาในการบด 1 ชั่วโมง 41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.2	ขั้นตอนการสังเคราะห์ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ charge ratio 20:1 ใช้เวลาในการบด 1 2 3 4 5 6 8 และ 10 ชั่วโมง	42
3.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ charge ratio และเวลาที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกริยาของซิลิกอนคาร์ไบด์	43
3.4	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยใช้ปริมาณด้วยผงนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน	44
3.5	ขั้นตอนการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์	45
3.6	เครื่องบดผสมแบบเชิงกล (SPEX mill)	46
3.7	เตาไฟฟ้าแบบท่อ (tube furnace)	48
3.8	สภาวะที่ใช้ในการให้ความร้อน	49
3.9	เครื่อง particle size analyzerของบริษัท Malvern Instrument Ltd	50
3.10	เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)	51
3.11	เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	55
3.12	เครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press) ของบริษัท Carver	56
3.13	ชิ้นงานที่มีขนาด 40 x 40 x 10 (กว้าง x ยาว x สูง) มิลลิเมตร	57
3.14	การฝังกลบด้วยการซ้อนถ้วยที่ทำจากอะลูมินา	58
3.15	กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์	59
3.16	กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์	60
3.17	กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์	61
3.18	เครื่อง universal testing machine	63
3.19	ลักษณะรอยกดและความยาวรอยแตกของชิ้นงาน	65
3.20	เครื่อง ion sputtering device	67
3.21	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	67
3.22	การวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เร็ต	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.23	เครื่องตัดความเร็วต่ำ (low speed saw)	69
3.24	เครื่องขัดกระดาษทราย	69
3.25	เครื่องเครื่องตัดความถี่สูง (ultrasonic disc cutter) ของบริษัท GATAN	70
3.26	ชิ้นตัวอย่างที่ได้ตัดด้วยเครื่องตัดความถี่สูง	70
3.27	เครื่องขัด disc grinder ของบริษัท GATAN	71
3.28	ชิ้นตัวอย่างที่ได้ขัดด้วย disc grinder	71
3.29	เครื่อง dimple deep ของบริษัท GATAN	72
3.30	ชิ้นตัวอย่างที่ขัดให้ลึกลงไปด้วยเครื่อง dimple deep	72
3.31	เครื่องกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน (ion milling) ของบริษัท GATAN	73
3.32	climping type duopost	73
3.33	ชิ้นตัวอย่างที่ทำการกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออน (ion milling)	74
3.34	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)	74
4.1	XRD แพทเทิร์นของผงอะลูมินา โดย A แสดงวัฏภาคแอลฟา- อะลูมินา	76
4.2	การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา	77
4.3	XRD แพทเทิร์นของผงคาร์บอน โดย C แสดงวัฏภาคคาร์บอน	79
4.4	การกระจายขนาดอนุภาคคาร์บอน	80
4.5	XRD แพทเทิร์นของผงซิลิกอน โดย Si แสดงวัฏภาคซิลิกอน	82
4.6	การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกอน	83
4.7	ชาร์ทเรโชที่ 10:1 20:1 30:1 40:1 และ 50:1 ก่อนทำการ annealing	84
4.8	ชาร์ทเรโชที่ 10:1 20:1 30:1 40:1 และ 50:1 หลังทำการ annealing	85
4.9	ชาร์ทเรโช 20:1 ที่การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงตัวอย่าง ก่อนจากทำการบดที่ชาร์ทเรโช 20:1 ที่เวลาต่าง ๆ กัน	86
4.10	ชาร์ทเรโช 20:1 โดยใช้เวลา 1 2 3 4 5 6 8 และ 10 ชั่วโมง หลัง annealing	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	ขนาดผลึกของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (nm) ที่เวลาบดผสมต่างกัน โดยใช้ชาร์ทเรโช 20:1	89
4.12	ขนาดผลึกของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ใช้ชาร์ทเรโชที่ 20:1 เวลาในการบด 5 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	90
4.13	วัฏภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่มีปริมาณ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 15 โดยปริมาตร เผาผนึกที่ 1750 องศาเซลเซียส	91
4.14	ผล Relative density ที่มีผลต่อปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างกัน	93
4.15	ผล Apparent Porosity ที่มีผลต่อปริมาณของ ซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างกัน	94
4.16	ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1550°C (a) Al_2O_3 (b) 5 vol% SiC (c) 10 vol% SiC (d) 15 vol% SiC	95
4.17	ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650°C (a) Al_2O_3 (b) 5 vol% SiC (c) 10 vol% SiC (d) 15 vol% SiC	97
4.18	ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C (a) Al_2O_3 (b) 5 vol% SiC (c) 10 vol% SiC (d) 15 vol% SiC	99
4.19	ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างกันมีปริมาณ SiC 15 vol% (a) 1550°C (b) 1650°C (c) 1750°C	101
4.20	ภาพถ่าย TEM ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ส่วนผสม 15vol% SiC ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1750°C	102
4.21	ผล Flexural Strength ของวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณ ซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างกัน	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.22 ผล Fracture toughness ของวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างกัน 105
4.23 ผล Vicker's hardness ของวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างกัน 106
จ.1 ตัวอย่างการหาค่า B (FWHM) 149