การเตรียมและลักษณะสมบัติของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก
ที่มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันสูง

นายเอกราช รุจิรกาโมทย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF HIGH THERMAL SHOCK RESISTANCE CORDIERITE GLASS CERAMICS

Mr. Ekaraj Rujirakamort

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและลักษณะสมบัติของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกที่มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันสูง
โดย	นายเอกราช รุจิรกาโมทย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คะชิมา

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ลดา พันธ์สุขุมธนา)

เอกราช รุจิรกาโมทย์ : การเตรียมและลักษณะสมบัติของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกที่มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันสูง (PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF HIGH THERMAL SHOCK RESISTANCE CORDIERITE GLASS CERAMIC) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ 80 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกของแก้วเซรามิกในระบบ $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ ที่ใช้ TiO_2 เป็นตัวช่วยการเกิดนิวเคลียส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จากเฟสไดอะแกรมแบบไตรภาคของ $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ ที่มีส่วนประกอบ 66.52% SiO_2, 23.49% Al_2O_3, 9.99% MgO และ 9% TiO_2 โดยน้ำหนัก เป็นแก้วที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดประมาณ $4.09X10^{-6}$ / °C แก้วที่หลอมที่อุณหภูมิ 1500 °C หล่อในแบบโลหะและอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 60 นาที ค่าสมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิการเกิดแก้ว T_g และ อุณหภูมิการตกผลึก T_c วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer นำแก้วไปผ่านกระบวนการทางความร้อน 3 แบบคือ 850 °C 2 ชั่วโมง / 950 °C 2 ชั่วโมง, 850 °C 2 ชั่วโมง / 1050 °C 2 ชั่วโมง และ 850 °C 2 ชั่วโมง / 1100 °C 2 ชั่วโมง ซึ่งกลาสเซรามิกที่มีองค์ประกอบทางเคมี 48.95 % SiO_2, 34.88 % Al_2O_3, 16.18 % MgO และ 9% TiO_2 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 850 °C 2 ชั่วโมง และ 1050 °C 2 ชั่วโมงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำที่สุดประมาณ 1.28×10^{-6} / °C เมื่อวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction พบว่าเฟสหลักคือ แอลฟาคอร์เดียไรต์

ภาควิชา : วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา : เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....
ปีการศึกษา : 2553	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

4972628023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : CORDIERITE / GLASS CERAMIC / LOW THERMAL EXPANSION COEFFICIENT / HIGH THERMAL SHOCK RESISTANCE

EKARAJ RUJIRAKAMORT: PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF HIGH THERMAL SHOCK RESISTANCE CORDIERITE GLASS CERAMIC. ADVISOR. ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., THESIS CO–ADVISOR: ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D., 80 pp.

Crystallization behavior and microstructure of MgO-Al_2O_3-SiO_2 glass ceramics containing TiO_2 as a nucleating agent were investigated. The goal of this study is to prepare cordierite glass ceramic with low thermal expansion coefficient. From the ternary phase diagram of MgO-Al_2O_3-SiO_2 selected glass compositions is 66.52 wt% SiO_2, 23.49 wt% Al_2O_3, 9.99 wt% MgO and 9 wt% TiO_2 which has lowest thermal expansion coefficients of about 4.09 $x10^{-6}$ / °C. Glass batches were melted at 1500 °C then poured in a metal die and annealed at 700 °C for 60 minutes. Thermal properties of melted glasses, glass transition temperature T_g and crystallization temperature T_c were analyzed by Differential Thermal Analysis (DTA). Thermal expansion coefficient of glasses was measured by dilatometer. Glasses were then heat treated at 850 °C / 950 °C for 2 hours , 850 °C / 1050 °C for 2 hours and 850 °C / 1100 °C for 2 hours. Glass ceramic compositions of 48.95 wt% SiO_2, 34.88 wt% Al_2O_3, 16.18 wt% MgO and 9 wt% TiO_2 obtained from heat treatment at 850 °C / 1050 °C for 2 hours shows lowest thermal expansion coefficients of 1.28 x 10^{-6} / °C with cordierite as a major crystalline phase analyzed by X-ray diffraction.

Department : Materials Science Student's Signature .....

Field of Study : Ceramic Technology Advisor's Signature .....

Academic Year : 2010 Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผศ.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับ คำแนะนำ แนวทางการดำเนินงานวิจัย และคำปรึกษาในความรู้เรื่องกลาสเซรามิกและแนวทางปฏิบัติในการทำงานวิจัย

ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับ คำแนะนำ แนวทางการดำเนินงานวิจัย และคำปรึกษาในเรื่องความรู้เพิ่มเติมในเรื่องงานวิจัยและเรื่องที่เกี่ยวข้อง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านสำหรับการตรวจแก้ไขรูปเล่ม และคำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ด้วยดีมาโดยตลอด

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและการทำงานวิจัย

เพื่อนๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีเซรามิกทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ญ
สารบัญรูป.....ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3
2.1 แก้ว.....3
2.1.1 แก้วโซดาไลม์.....3
2.1.2 แก้วบอโรซิลิเกต.....4
2.1.3 แก้วตะกั่ว.....4
2.1.4 แก้วโอปอล.....4
2.1.5 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต.....5
2.1.6 แก้วแอลคาไลน์เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกต.....5
2.1.7 กลาสเซรามิก.....5
2.2 การเกิดนิวเคลียส.....7
2.2.1 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์.....8
2.2.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสวิวิธพันธ์.....10
2.3 เซรามิกคอร์เดียไรต์.....12
2.3.1 ผลิตภัณฑ์คอร์เดียไรต์วัสดุทนไฟ.....13
2.3.2 ผลิตภัณฑ์คอร์เดียไรต์ชนิดเคลือบ.....13
2.3.3 ผลิตภัณฑ์คอร์เดียไรต์ชนิดแก้วหรือกลาสเซรามิก.....14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....14

หน้า

บบที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....16
3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....16
3.2 แผนผังการทดลอง.....17
3.3 วิธีการทดลอง.....18
3.3.1 ขั้นตอนเตรียมกลาสเซรามิกคอร์เดียไรต์.....18
3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของแก้วคอร์เดียไรต์.....22
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของกลาสเซรามิก.....22
3.3.4 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน.....23
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....24
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของแก้วคอร์เดียไรต์.....24
4.1.1 ผลการสังเกตเรื่องของสี.....24
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนของแก้วคอร์เดียไรต์ (Differential thermal analysis).....25
4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (X-ray diffraction analysis) ของแก้วคอร์เดียไรต์.....28
4.1.4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient) ที่ 100-500°C ของแก้วคอร์เดียไรต์.....29
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ด้วยวิธีอาร์คีมิดิส (Archemedis Method) โดยใช้มาตรฐาน ASTM C373-88 32
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของกลาสเซรามิก (cordierite glass ceramic) ในboundary ของคอร์เดียไรต์.....33
4.2.1 ผลการสังเกตเรื่องของสีและ การเป็นเนื้อเดียวกันของคอร์เดียไรต์ กลาสเซรามิก.....33
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (X-ray diffraction analysis) ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก.....35
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ของกลาสเซรามิก.....39
4.2.4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน.....39
4.2.5 ผลของเวลาในการทำ Heat treatment ต่อ สมบัติของคอร์เดียไรต์ กลาสเซรามิก.....41

หน้า

4.3 การวิเคราะห์สมบัติของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ในไดอะแกรม Forsterite-spinel-cordierite ภายในขอบเขตของคอร์เดียไรต์.....46
4.3.1 ผลการทดลองสำหรับ CGn1 ถึง CGn12 Heat treatment 2 (850°C 2 ชั่วโมง 1050°C 2 ชั่วโมง).....48
4.4 การวิเคราะห์สมบัติของกลาสเซรามิกคอร์เดียไรต์ที่เติม B_2O_3 และ เพิ่ม TiO_2.....50
4.4.1 CGn เพิ่ม TiO_2 เป็น 12% คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2 50
4.4.2 CGn เติม B_2O_3 0.5% คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2.....52
4.4.3 เติม B_2O_3 1% คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2.....53
4.4.4 เติม B_2O_3 0.5% และ เพิ่ม TiO_2= 12% คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2.....54
บบที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....57
5.1 สรุปผลการวิจัย.....57
5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของแก้วคอร์เดียไรต์ ในboundary ของคอร์เดียไรต์.....57
5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติของกลาสเซรามิกคอร์เดียไรต์ ในboundary ของคอร์เดียไรต์.....57
5.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของกลาสเซรามิกคอร์เดียไรต์ในสามเหลี่ยม Forsterite-spinel-cordierite ภายใน boundary ของคอร์เดียไรต์.....57
5.1.4 การวิเคราะห์สมบัติของกลาสเซรามิกคอร์เดียไรต์ที่เติม B_2O_3 และ เพิ่ม TiO_2.....58
5.2 ข้อเสนอแนะ 58
รายการอ้างอิง.....59
ภาคผนวก.....61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....68

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ.....16
ตารางที่ 3.2 สูตรแก้ว % ออกไซด์โดยน้ำหนัก.....19
ตารางที่ 3.3 สูตรแก้ว % วัตถุดิบโดยน้ำหนัก.....19
ตารางที่ 4.1 Glass Transition Temperature (T_g) และ Crystallization temperature (T_C) ของ CG1 ถึง CG12.....27
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ของแก้ว ($X10^{-6}$/K).....30
ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ของแก้วคอร์เดียไรต์ CG1 ถึง CG12.....32
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก CG1 ถึง CG12 ht2.....39
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิกของ CG ht1 ถึง ht3.....40
ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิกของ ht4 เปรียบเทียบกับ ht2.....42
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของ Kaolin และ หินสบู่.....47
ตารางที่ 4.8 สูตร CGn1 ถึง CGn12 % ออกไซด์โดยน้ำหนัก.....47
ตารางที่ 4.9 สูตร CGn1 ถึง CGn12 % วัตถุดิบโดยน้ำหนัก.....48
ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิก CGn1 ถึง CGn12.....49
ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn เมื่อ TiO_2 เพิ่มเป็น 12%.....51
ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn B2O3 0.5%.....52
ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn B2O3 1%.....53
ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn B2O3 0.5%+TiO2 12%.....54
ตารางที่ 4.15 ค่าการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของ 4.CGn02_ht2.....56

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภูมิแสดงการเกิดผลึก....8
รูปที่ 2.2 พลังงานอิสระที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเกิดนิวเคลียส....9
รูปที่ 2.3 การเกิดนิวเคลียสบนผนังภาชนะ....11
รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของเซรามิก คอร์เดียไรต์....12
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการสังเคราะห์และเตรียมคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก....17
รูปที่ 3.2 Phase diagram ของระบบ $MgO-Al_2O_3-SiO_2$....18
รูปที่ 3.3 กราฟอุณหภูมิและเวลาในการหลอมแก้วและการอบอ่อน....20
รูปที่ 3.4 กราฟอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทางความร้อน (ภาวะที่ 2)....21
รูปที่ 4.1 สีของแก้วคอร์เดียไรต์ CG1-CG12....24
รูปที่ 4.2 สีของแก้วคอร์เดียไรต์ CG1-CG12 โดยเรียงตาม % Fe_2O_3....25
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย Differential thermal analysis ของ CG1....26
รูปที่ 4.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของแก้วคอร์เดียไรต์ CG5....28
รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ที่ 25-500°C ของ CG1....29
รูปที่ 4.6 กลุ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้วคอร์เดียไรต์จากต่ำ (สีเข้ม)ไปสูง(สีอ่อน)....30
รูปที่ 4.7 กลุ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้วคอร์เดียไรต์โดยการคำนวน....31
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht1 850oC 2 ชั่วโมง และ950°C 2 ชั่วโมง....33
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht2 850oC 2 ชั่วโมง และ1050°C 2 ชั่วโมง....34
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht3 850°C 2 ชั่วโมง และ1100°C 2 ชั่วโมง....34
รูปที่ 4.11 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht1....36
รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht2....37
รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht3....38
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht4 850°C 4 ชั่วโมง และ1050°C 4 ชั่วโมง....41

หน้า

รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG1.....41

รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG7.....42

รูปที่ 4.17 SEM micrographs ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG1.....43

รูปที่ 4.18 SEM micrographs ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกCG1 ht2.....43

รูปที่ 4.19 SEM micrographs ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG7.....44

รูปที่ 4.20 ตัวอย่างรวมของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก CG1 ถึง CG12.....45

รูปที่ 4.21 Phase diagram ของระบบ $MgO-Al_2O_3-SiO_2$.....46

รูปที่ 4.22 ตัวอย่างของ CGn ที่ Heat treatment ht2 850°C 2 ชั่วโมง และ1050°C 2 ชั่วโมง.....49

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างของ CGn add TiO_2 12% ที่ Heat treatment ht2 850 °C 2 ชม. และ1050°C 2 ชม.....51

รูปที่ 4.24 ตัวอย่างของ CGn Dope B_2O_3 0.5% ที่ Heat treatment ht2 850°C 2 ชม. และ1050°C 2 ชม.....52

รูปที่ 4.25 ตัวอย่างของ CGn Dope B_2O_3 1% ที่ Heat treatment ht2 850°C 2 ชม.และ1050°C 2 ชม.....53

รูปที่ 4.26 ตัวอย่างของ CGn Dope B_2O_3 0.5% และ เพิ่ม TiO_2= 12% ที่ Heat treatment ht2 850°C 2 ชม.และ1050°C 2 ชม.....54

รูปที่ 4.27 องค์ประกอบทางเฟสของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก 4.CGn02_ht2.....55

รูปที่ 4.28 SEM micrographs ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก 4.CGn02_ht2 แนวตั้งเปรียบเทียบกับแนวนอน.....56