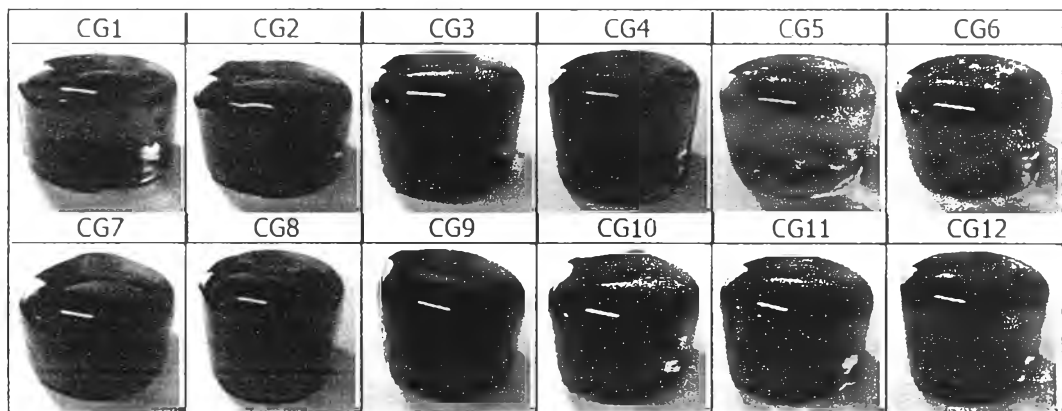


บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของแก้วคอร์เดียวไรต์

4.1.1 ผลการสังเกตเรื่องของสี










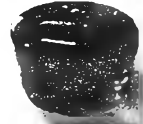


แก้วคอร์เดียวไรต์ที่ได้จากการทดลองมีสีน้ำตาลอ่อนไปจนถึงน้ำตาลเข้มแสดงดังรูปที่ 4.1 สีน้ำตาลของแก้วเกิดจาก Fe_2O_3 ในส่วนผสมซึ่งเป็นมลทินที่มาจากดิน Kaolin ที่มี Fe_2O_3 เท่ากับ 0.75% โดยน้ำหนัก ส่วนวัตถุดิบอื่นเช่น ควอตซ์ และ ทัลค์ มีปริมาณ Fe_2O_3 เพียงเล็กน้อยเท่ากับ 0.10% และ 0.07% ตามลำดับซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับดิน Kaolin ดังนั้นสีของแก้วคอร์เดียวไรต์จึงขึ้นอยู่กับปริมาณดิน Kaolin ในสูตรผสมเป็นตัวหลัก



รูปที่ 4.1 สีของแก้วคอร์เดียวไรต์ CG1-CG12

จากรูปที่ 4.2 เป็นสีของแก้วคอร์เดียวไรต์ CG1-CG12 เปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของ Fe_2O_3 ที่ได้จากการคำนวณส่วนผสมรวม สูตร CG5 มีสีอ่อนที่สุดเนื่องจากไม่ได้ใส่ดิน Kaolin ในส่วนผสมทำให้ปริมาณ Fe_2O_3 ในส่วนผสมมีเพียง 0.05% แต่ CG7 มีสีเข้มที่สุดเพราะใส่ดิน Kaolin ในปริมาณที่สูงมากถึง 50% ทำให้เปอร์เซ็นต์ของ Fe_2O_3 ที่ได้จากการคำนวณส่วนผสมรวมเท่ากับ 0.44%

ความหนืดของน้ำแก้วมีส่วนสำคัญในการขึ้นรูป จากการทดลองสูตร CG5 จะใส่มากขณะเท ส่วนสูตร CG7 เป็นสูตรที่หนืดมากที่สุดขณะเทโดยดูจากปริมาณแก้วที่ติดกับ crucible ในปริมาณมากกว่าสูตรอื่น

CG5		0.05%	CG11		0.20%	CG10		0.31%
CG4		0.19%	CG1		0.23%	CG2		0.33%
CG12		0.19%	CG8		0.25%	CG3		0.34%
CG6		0.19%	CG9		0.31%	CG7		0.44%

รูปที่ 4.2 สีของแก้วคอร์เดียวไรต์ CG1-CG12 โดยเรียงตาม % Fe₂O₃

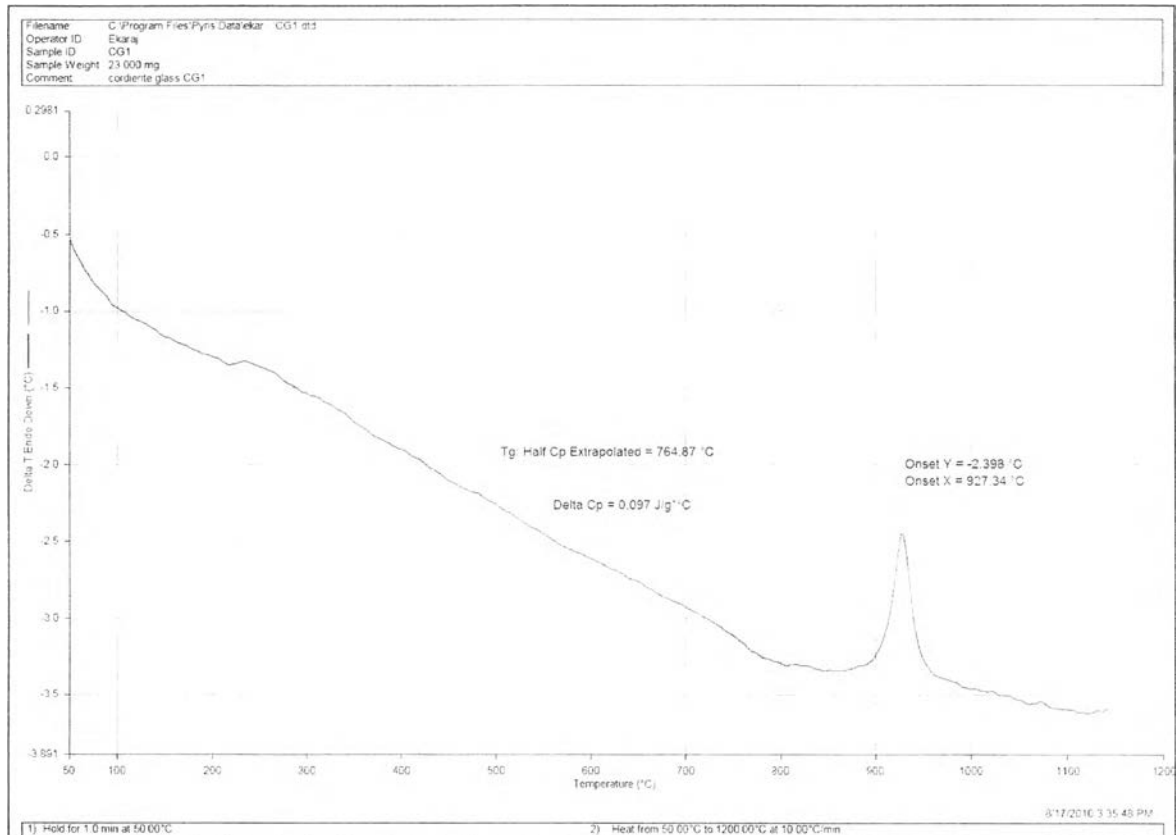
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential thermal analysis)

ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยด้วยเครื่อง DTA ทำให้ทราบ Glass Transition Temperature (T_g) และ Crystallization temperature (T_c) จากรูปที่ 4.3 ได้หาค่า Glass Transition Temperature (T_g) โดยการหาจุดที่มีการเปลี่ยนความชันของกราฟระหว่าง % การเปลี่ยนแปลงการดูดหรือคายพลังงาน กับ อุณหภูมิ โดยกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของการเปลี่ยนความชัน ซึ่งค่าระหว่างกลางระหว่างจุดจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของการเปลี่ยนความชันคือ จุด ค่า Glass Transition Temperature (T_g) ส่วน Crystallization temperature (T_c) เป็นการหาจุดสูงสุด (peak) ของกราฟ

จากการทดลองของ Zhang และคณะ^[17] ทำให้เราทราบความสัมพันธ์ระหว่าง Nucleation temperature กับ Glass Transition Temperature (T_g) และ อุณหภูมิการโตของผลึกกับอุณหภูมิในการเกิดผลึก

โดยจากผลการวิเคราะห์ด้วย Differential thermal analysis ของ CG1 ซึ่งทำให้ทราบ Glass Transition Temperature (T_g) อยู่ที่อุณหภูมิ 765 °C และ Crystallization temperature (T_c) อยู่ที่อุณหภูมิ 927 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แล้วจึงนำมากำหนดตารางการทำ กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ซึ่งเป็นกระบวนการทำเป็น glass ceramic โดยการควบคุมการเกิดผลึก

โดยทั่วไปจะทำ 2 ขั้นตอนคือการสร้าง nucleus และการโตของนิวเคลียสที่อุณหภูมิ Nucleation และอุณหภูมิ Crystal growth



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย Differential thermal analysis ของ CG1

จากตารางที่ 4.1 Glass Transition Temperature (T_g) และ Crystallization temperature (T_c) ของ CG1 ถึง CG12 อุณหภูมิ Glass Transition Temperature (T_g) ของ CG1 ถึง CG12 อยู่ระหว่าง 720 °C ถึง 789 °C โดยทั่วไปจะกำหนดอุณหภูมิ Nucleation ให้ใกล้เคียงอุณหภูมิ Glass Transition Temperature (T_g) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงกำหนดอุณหภูมิ Nucleation อยู่ที่ 850 °C

ส่วนอุณหภูมิ Crystallization temperature (T_c) ของ CG1 ถึง CG12 อยู่ระหว่าง 894 °C ถึง 980 °C ซึ่งในการกำหนดอุณหภูมิ Crystal growth ก็จะพิจารณาจากอุณหภูมิ Crystallization temperature (T_c) โดยเริ่มจากกำหนดเท่ากับอุณหภูมิ Crystallization temperature (T_c) คือ 950 °C แล้วจึงเพิ่มขึ้นเป็น 1050 °C และ 1100 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 Glass Transition Temperature (T_g) และ Crystallization temperature (T_c) ของ CG1 ถึง CG12

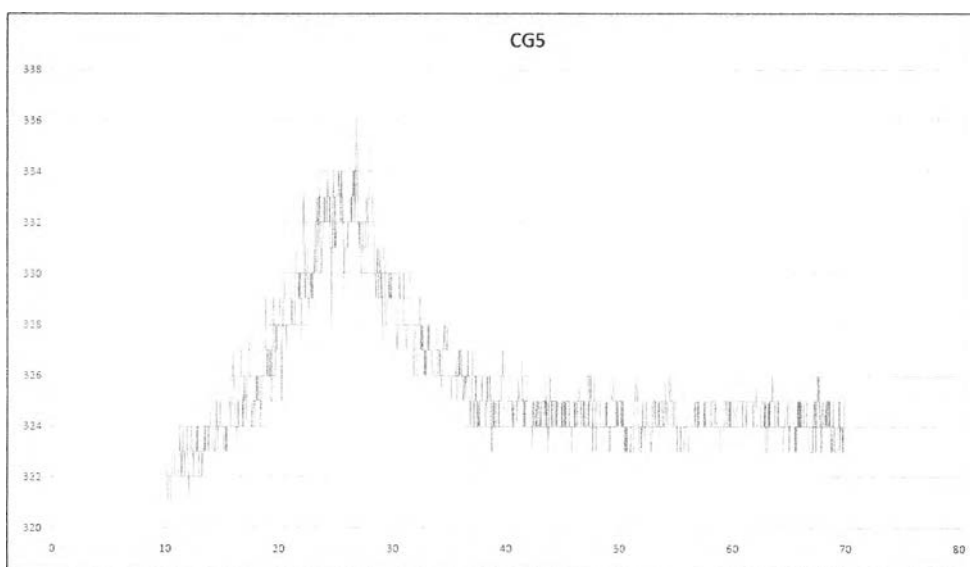
Sample Number	Glass Transition Temperature T_g ($^{\circ}\text{C}$)	Crystallization temperature T_c ($^{\circ}\text{C}$)
CG1	765	927
CG2	778	976
CG3	744	923
CG4	720	927
CG5	740	941
CG6	733	933
CG7	789	980
CG8	758	894
CG9	749	908
CG10	758	918
CG11	742	931
CG12	728	939

ดังนั้นเมื่อได้ผลการทดลองของ Glass Transition Temperature (T_g) และ Crystallization temperature (T_c) ของ CG1 ถึง CG12 ตามตารางที่ 1 ดังกล่าวจึงได้นำมากำหนดภาวะการทำกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) เป็น 3 ภาวะดังนี้

1. ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชม. และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 950°C เป็นเวลา 2 ชม.
2. ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชม. และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1050°C เป็นเวลา 2 ชม.
3. ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชม. และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1100°C เป็นเวลา 2 ชม.

4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (X-ray diffraction analysis) ของแก้วคอร์เดียไรต์

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของแก้วคอร์เดียไรต์เพื่อตรวจสอบว่าแก้วที่หลอมนั้นสามารถหลอมได้หมดหรือไม่ โดยตรวจสอบจากผลึกที่เหลือจากการหลอมด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ซึ่งสมบัติของแก้วเป็นอสัณฐานซึ่งไม่มีผลึก ดังนั้นจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสถ้าไม่เหลือผลึกแสดงว่าสามารถเป็นแก้วที่หลอมได้หมด



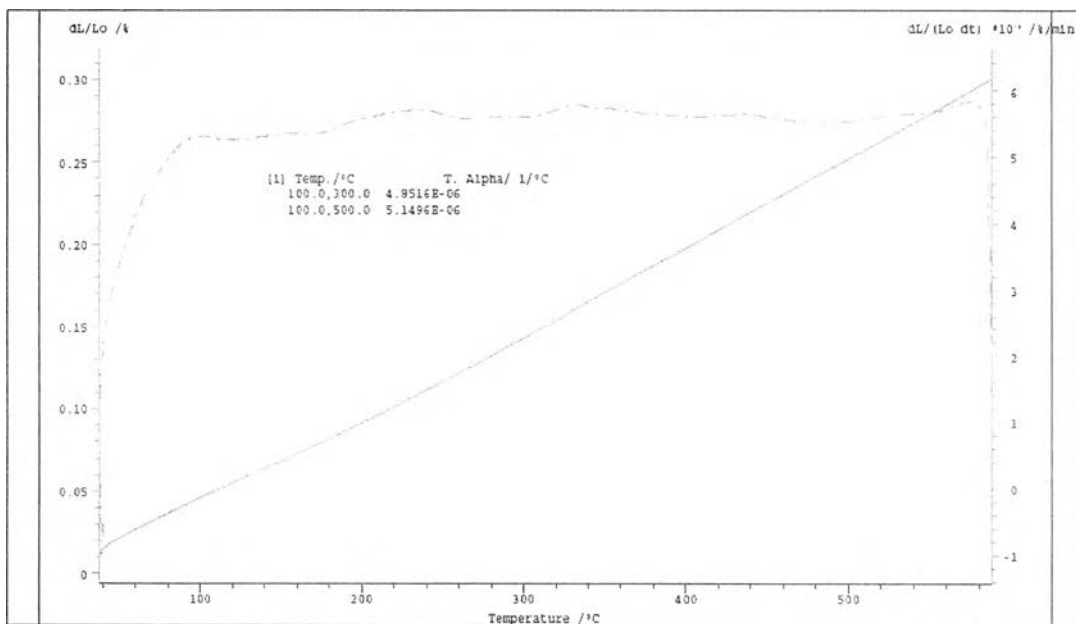
รูปที่ 4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของแก้วคอร์เดียไรต์ CG5

CG5 ซึ่งเป็นสูตรที่สามารถหลอมได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งไม่พบ peak ของผลึกเกิดขึ้น แสดงว่าวัตถุดิบสูตร CG5 หลอมที่ 1500 °C เป็นแก้วที่เป็นอสัณฐาน

จากผลวิจัยของ H. Shao และคณะ^[13] จะพบเฟสคอร์เดียไรต์ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 950 °C แต่ถ้าต่ำกว่าหรือที่ 780 °C จะได้แก้วที่เป็นอสัณฐาน ดังนั้นเราจะนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้เกิดเป็นกลาสเซรามิก

4.1.4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient) ที่ 100-500 °C ของแก้วคอร์เดียไรต์

การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient) ที่อุณหภูมิ 25 °C ถึง 500 °C แต่จะวิเคราะห์ที่อุณหภูมิที่ 100-500 °C เพราะในช่วง 25 °C ถึง 100 °C ส่วนใหญ่จะได้กราฟที่ไม่คงที่ จากรูปที่ 4.5 เป็นการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ 25-500 °C ของ CG1 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกกราฟจะไม่คงที่แต่หลังจากอุณหภูมิ 100 °C กราฟจะคงที่ ดังนั้นจึงเลือกวิเคราะห์ที่อุณหภูมิที่ 100-500 °C



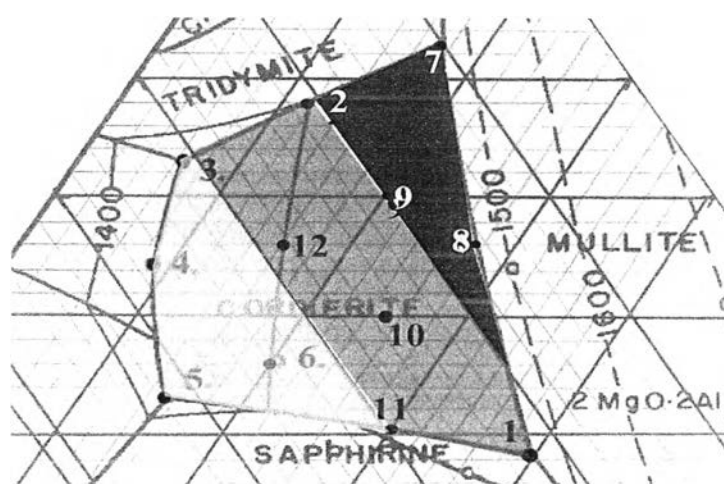
รูปที่ 4.5 วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ที่ 25-500 °C ของ CG1

แก้วคอร์เดียไรต์ทั้ง 12 สูตร มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 ผลที่ได้คือ CG7 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดเท่ากับ $3.97 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ที่ 100-500 °C และกลุ่มที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำรองลงมาคือ CG8, CG2, CG9 เท่ากับ 4.52×10^{-6} , 4.59×10^{-6} และ 5.06×10^{-6} ตามลำดับ และกลุ่มที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงที่สุดคือ CG6, CG5 และ CG4 เท่ากับ 5.53×10^{-6} , 5.63×10^{-6} และ 5.75×10^{-6}

เมื่อวิเคราะห์จากสูตรส่วนผสมแก้ว โดยใช้อัตราส่วนของออกไซด์โดยน้ำหนัก ในตารางที่ 3.2 CG7 มี SiO₂ สูงสุดคือ 66.52 wt% ซึ่ง SiO₂ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าออกไซด์ตัวอื่น เท่ากับ $0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[20] ส่วน MgO และ Al₂O₃ เท่ากับ $13.50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[20] และ $8.50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[21] ดังนั้นสูตรส่วนผสมแก้วที่มี SiO₂ สูงก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ของแก้ว ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

Glass for CG1 to CG12	COE($\times 10^{-6}$) 100-500 $^{\circ}\text{C}$	ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วย โปรแกรม Uniglass ^[12]
CG1	5.15	3.25
CG2	4.60	3.66
CG3	5.48	4.00
CG4	5.75	4.11
CG5	5.63	4.11
CG6	5.53	3.86
CG7	3.97	3.27
CG8	4.52	3.24
CG9	5.06	3.50
CG10	5.13	3.58
CG11	5.51	3.60
CG12	5.19	3.77



รูปที่ 4.6 กลุ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้วคอร์เตียไรต์จากต่ำ (สีเข้ม) ไปสูง(สีอ่อน)

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้วคอร์เดียไรต์เทียบกับพื้นที่ในเฟสไดอะแกรมแบบไตรภาคของ $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ โชนที่มีสีเข้มจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าโชนที่มีสีอ่อน

จากตารางการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยใช้โปรแกรม UNIGLASS⁽¹⁹⁾ ได้นำสูตรของ CG1 ถึง CG12 ได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงว่าจุดที่อยู่ทางขวาของเฟสไดอะแกรมหรือที่เส้นอุณหภูมิสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าจุดที่อยู่ทางซ้ายของเฟสไดอะแกรมหรือที่เส้นอุณหภูมิต่ำ

ดังนั้นจึงแบ่งตามค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มสูงได้แก่ CG3, CG4 และ CG5, กลุ่มกลางได้แก่ CG2,CG6,CG12, CG9,CG10 และ CG11 และกลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มต่ำได้แก่ CG1,CG8 และ CG7

ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้วคอร์เดียไรต์ที่ได้แบ่งเป็นกลุ่มเช่นกัน

แต่ผลที่ได้จากโปรแกรม UNIGLASS ต่ำกว่าผลที่ได้จากผลการทดลอง ดังในตารางที่ 4.2 เพราะผลการวิเคราะห์วัตถุบิได้จากผู้จำหน่ายวัตถุบิโดยตรงยังไม่นำมาวิเคราะห์ XRF ดังนั้นอาจเป็นข้อผิดพลาดประการหนึ่งได้



รูปที่ 4.7 กลุ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้วคอร์เดียไรต์โดยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม UNIGLASS

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ด้วยวิธีอาร์คิมิดีส (Archimedes Method) โดยใช้มาตรฐาน ASTM C373-88

ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ของแก้วคอร์เดียไรต์ CG1 ถึง CG12

Glass Sample	Density (g/cm ³) B=D/(M-S)
CG1	2.76
CG2	2.65
CG3	2.72
CG4	2.77
CG5	2.82
CG6	2.78
CG7	2.60
CG8	2.69
CG9	2.69
CG10	2.75
CG11	2.75
CG12	2.73

หมายเหตุ M คือ Saturated, D คือ Dry และ S คือ suspended

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่น (Density) ซึ่งมีค่าระหว่าง 2.6 ถึง 2.82 g/cm³ CG5 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดคือ 2.82 g/cm³ และ CG7 มีค่าความหนาแน่นต่ำสุดคือ 2.60 g/cm³

เมื่อวิเคราะห์จากสูตรส่วนผสมแก้ว โดยใช้อัตราส่วนของออกไซด์โดยน้ำหนัก ในตารางที่ 3.2 CG7 มี SiO₂ สูงสุดคือ 66.52 wt% ซึ่ง SiO₂ มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า ออกไซด์ตัวอื่น เท่ากับ 2.65 g/cm³ [20] ส่วน MgO และ Al₂O₃ เท่ากับ 3.60 g/cm³ [20] และ 3.89 g/cm³ [20] ดังนั้นสูตรส่วนผสมแก้วที่มี SiO₂ สูงก็จะมีค่าความหนาแน่นต่ำ

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของกลาสเซรามิก (cordierite glass ceramic) ใน boundary ของคอร์เดียไรต์

จาก Glass Transition Temperature (T_g) และ Crystallization temperature (T_c) แล้วนำมากำหนดตารางการทำ กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) โดยกำหนดทั้งหมด 3 แบบดังนี้คือ

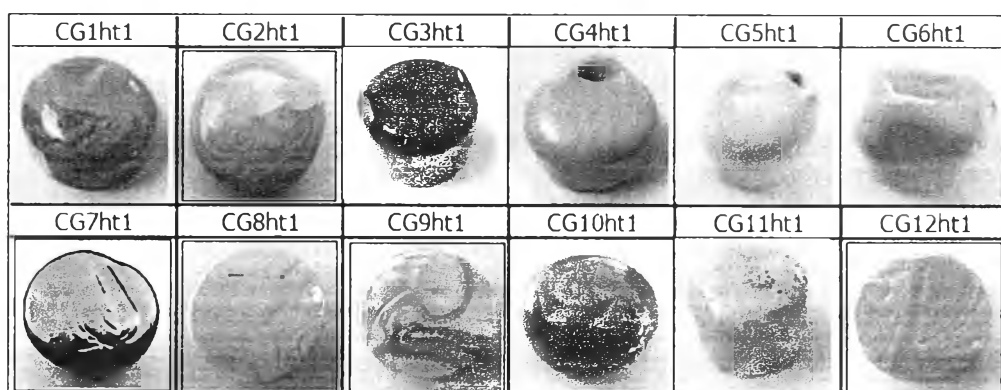
- Heat treatment ภาวะที่ 1 (ht1) Nucleation temperature ที่ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง

- Heat treatment ภาวะที่ 2 (ht2) Nucleation temperature ที่ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง

- Heat treatment ภาวะที่ 3 (ht3) Nucleation temperature ที่ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง

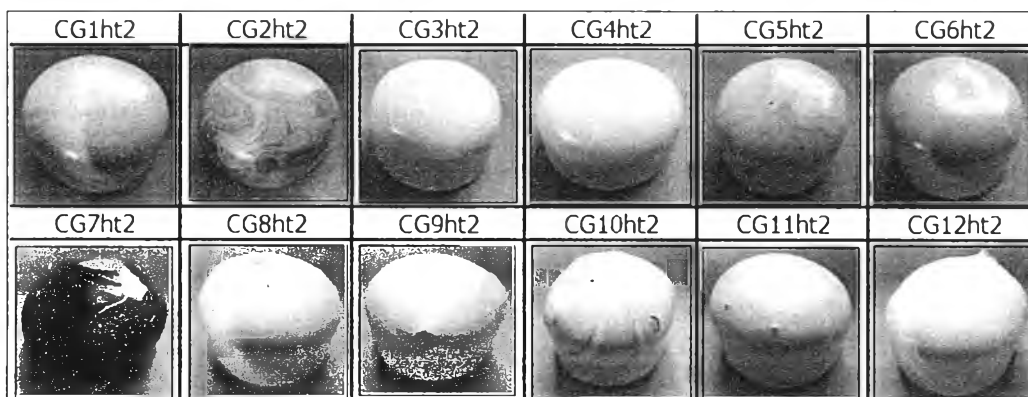
ผลการทดลองจะแบ่งเป็นทั้งหมด 3 ภาวะซึ่งสรุปเป็นหัวข้อสำคัญ 5 หัวข้อคือสีของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วย XRD วิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ของกลาสเซรามิก การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และการทดสอบอุณหภูมิ Thermal shock resistance

4.2.1 การสังเกตสี และการเป็นเนื้อเดียวกันของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก



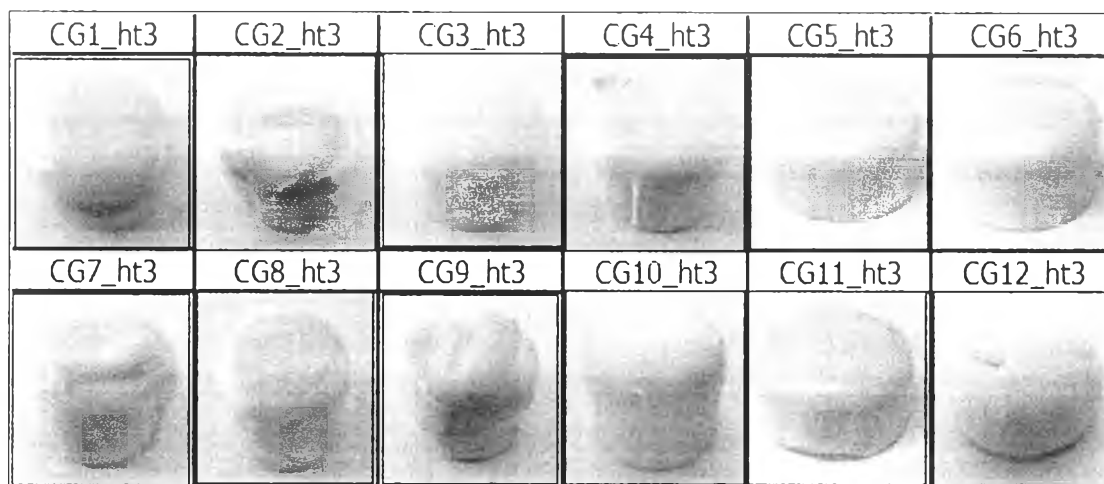
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht1 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง และ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง

จากรูป 4.8 Heat treatment ภาวะที่ 1 (ht1) Nucleation temperature ที่ 850°C 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ 950°C 2 ชั่วโมง สียังเป็นสีเข้มเป็นส่วนใหญ่และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht2 850°C 2 ชั่วโมง และ 1050°C 2 ชั่วโมง

จากรูป 4.9 Heat treatment ภาวะที่ 2 (ht2) Nucleation temperature ที่ 850°C 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ 1050°C 2 ชั่วโมงสีส่วนใหญ่เริ่มเป็นสีเทาและเป็นเนื้อเดียวกันแต่ยกเว้น CG7 ยังคงเป็นสีเข้มเหมือนเดิม



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht3 850°C 2 ชั่วโมง และ 1100°C 2 ชั่วโมง

จากรูป 4.10 Heat treatment ภาวะที่ 3 (ht3) Nucleation temperature ที่ 850°C 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ 1100°C 2 ชั่วโมงการเพิ่มอุณหภูมิของ Crystal growth temperature เป็น 1100°C ทำให้สีของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกเป็นสีเทาอ่อนเกือบขาวทุกตัวอย่างและเป็นเนื้อเดียวกัน

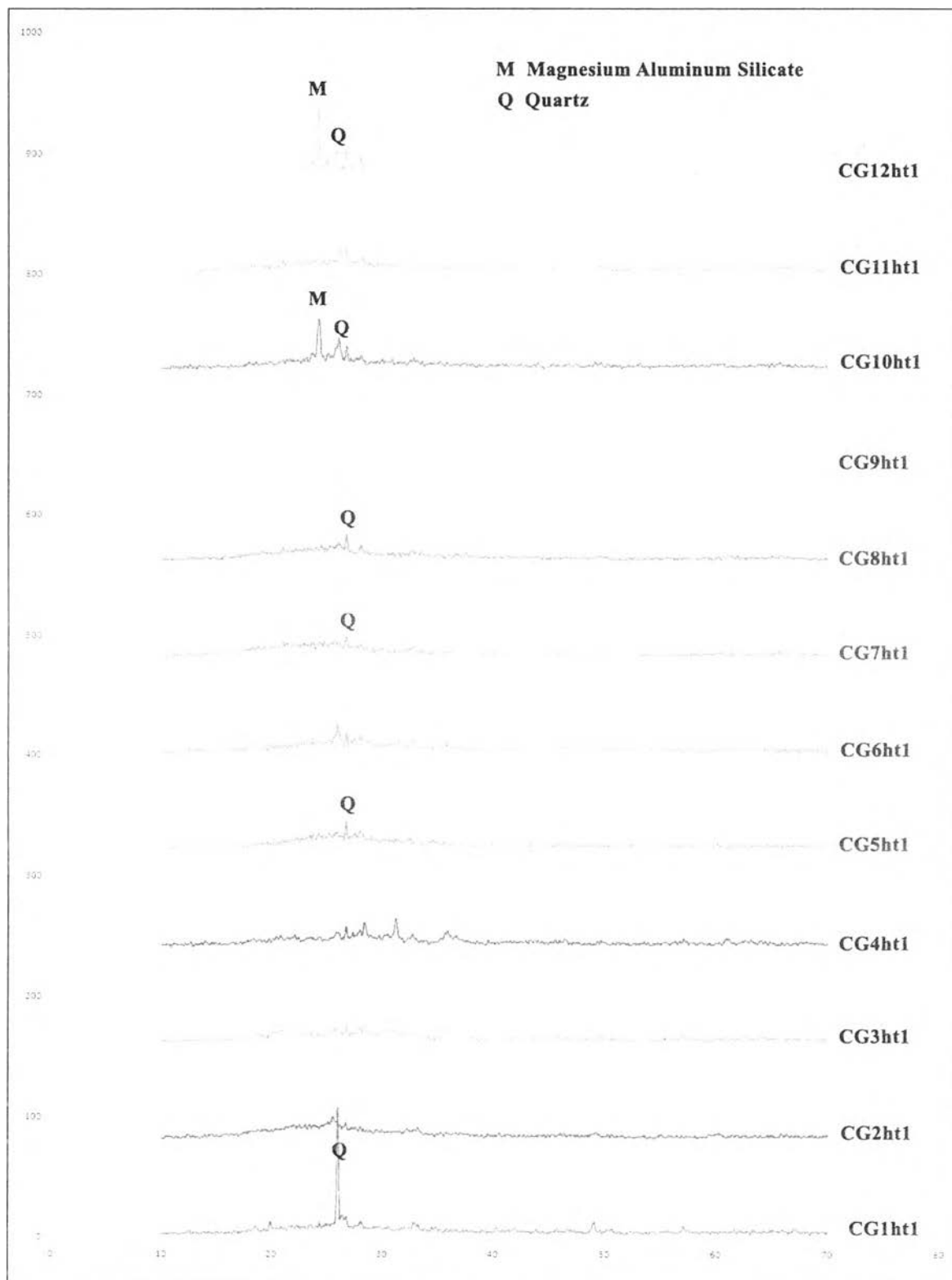
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเฟส (X-ray diffraction analysis) ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก

จากการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกในรูปแบบที่ 4.11 พบว่า Heat treatment ภาวะที่ 1 (ht1) Nucleation temperature ที่ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ 950°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สูตรแก้วส่วนใหญ่ยังมีสมบัติเป็นแก้วอยู่เนื่องจากว่ายังไม่มี peak ที่ชัดเจน เพราะใช้ Crystal growth temperature ที่อุณหภูมิต่ำเกินไป แต่สูตร CG1 เกิดเฟสควอตซ์ (JCPDS: 01-075-1555) และสูตร CG10, CG12 เกิดเฟส Magnesium Aluminum Silicate (JCPDS: 00-014-0346)

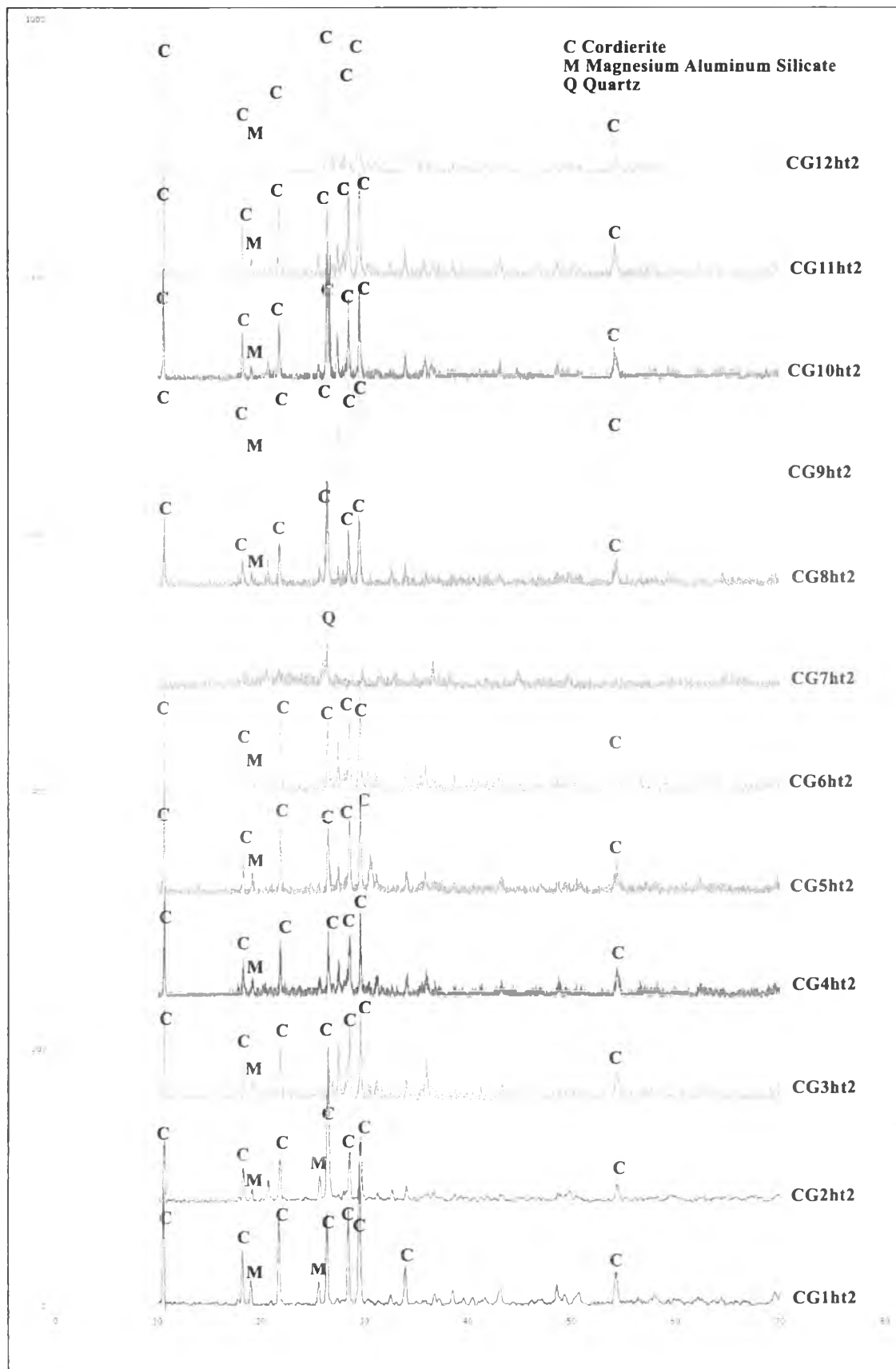
จากการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกในรูปแบบที่ 4.12 พบว่า Heat treatment ภาวะที่ 2 (ht2) Nucleation temperature ที่ 850°C 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ 1050°C 2 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าเกิดเฟสคอร์เดียไรต์ (JCPDS : 01-084-1219) เป็นเฟสหลักและเกิดเฟส Magnesium Aluminum Silicate (JCPDS : 00-014-0346) เป็นเฟสรอง ยกเว้น CG7 เกิดเฟสหลักคือ ควอตซ์ (JCPDS : 01-075-1555)

จากการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกในรูปแบบที่ 4.13 พบว่า Heat treatment ภาวะที่ 3 (ht3) Nucleation temperature ที่ 850°C 2 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ 1100°C 2 ชั่วโมง เกิดเฟสหลักเป็นคอร์เดียไรต์ (JCPDS : 01-084-1219) และเฟสรองเป็น Magnesium Aluminum Silicate (JCPDS : 00-014-0346) เหมือน Heat treatment 2 แต่ความสูงของ Peak (Intensity) ของกราฟน้อยกว่า Heat treatment ภาวะที่ 2 ส่วน CG7 เกิดเฟสหลักคือ ควอตซ์ (JCPDS : 01-075-1555) เหมือน Heat treatment ภาวะที่ 2 แต่ความสูงของ Peak (Intensity) ของกราฟมากกว่า Heat treatment ภาวะที่ 2

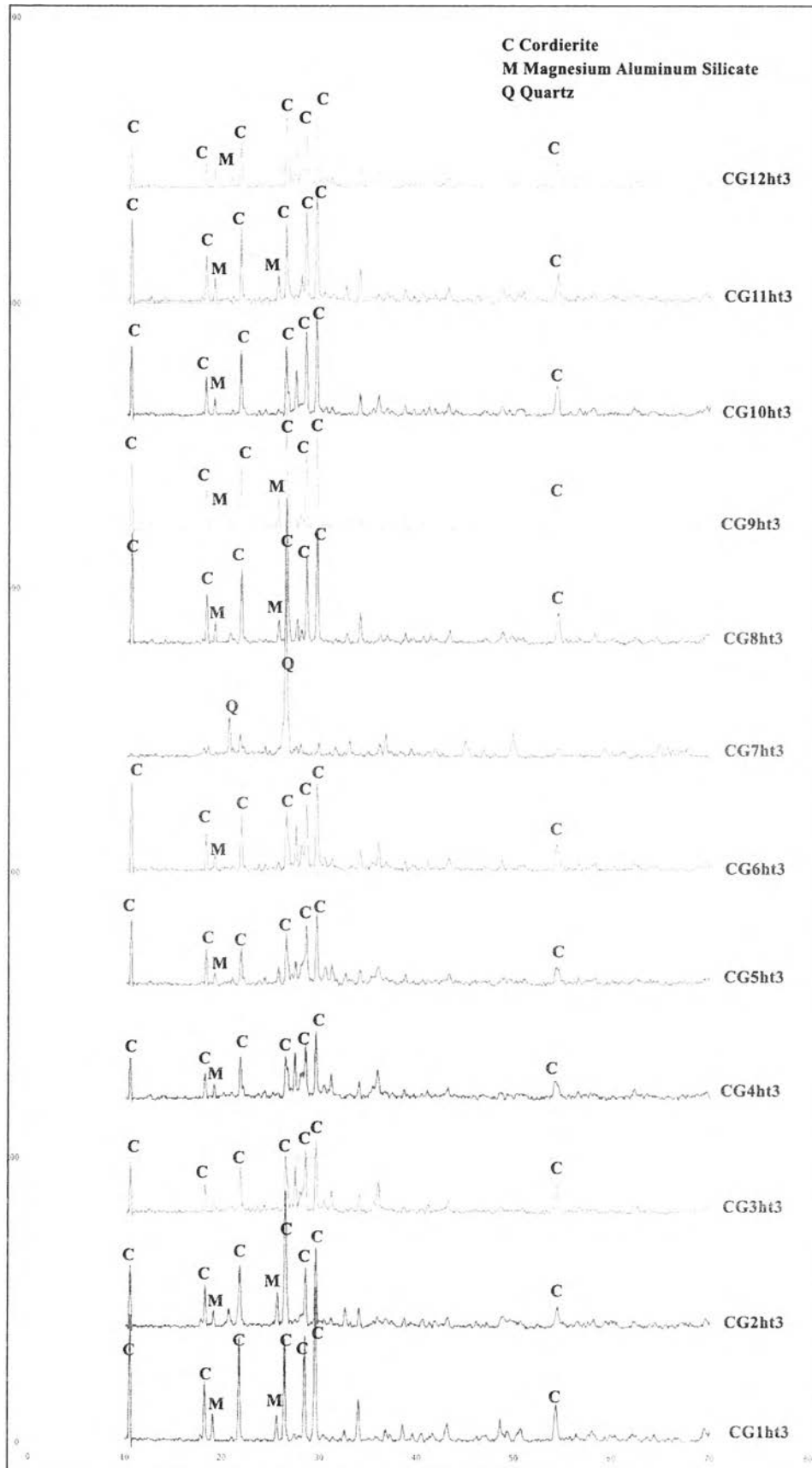
จากผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกทั้ง 3 ภาวะ Heat treatment ภาวะที่ 1 (ht1) ทุกสูตรยังมีสมบัติเป็นแก้วเนื่องจากใช้ Crystal growth temperature ที่อุณหภูมิต่ำเกินไปแต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ Crystal growth temperature เป็น 1050°C ในภาวะ Heat treatment ภาวะที่ 2 (ht2) สูตรส่วนใหญ่เริ่มเกิดเฟสคอร์เดียไรต์เพราะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยของ H. Shao และคณะ^[13] ที่พบเฟสคอร์เดียไรต์ได้เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 950°C แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ Crystal growth temperature เป็น 1100°C ในภาวะ Heat treatment ภาวะที่ 3 (ht3) สูตรส่วนใหญ่ยังเกิดเฟสคอร์เดียไรต์อยู่ แต่ในปริมาณที่น้อยลงดังนั้นภาวะ Heat treatment ที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดเฟสคอร์เดียไรต์คือ Heat treatment ภาวะที่ 2 (ht2)



รูปที่ 4.11 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht1



รูปที่ 4.12 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์ดีเอไรต์-โกลาสเซรามิก ht2



รูปที่ 4.13 วิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์ดีเอร์ไตโรต์กลาสเซรามิก ht3

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) ของกลาสเซรามิก

จากตารางที่ 4.4 ความหนาแน่น (Density) ของกลาสเซรามิก Heat treatment 2 ที่สูงสุดคือ CG5 เท่ากับ 3.00 g/cm^3 และความหนาแน่น (Density) ของกลาสเซรามิก Heat treatment 2 ที่ต่ำสุดคือ CG8 เท่ากับ 2.64 g/cm^3

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก CG1 ถึง CG12 ht2

ht2 850°C2h.1050°C2h.	Density (g/cm^3) $B=D/(M-S)$
CG1	2.65
CG2	2.91
CG3	2.82
CG4	2.88
CG5	3.00
CG6	2.81
CG7	2.75
CG8	2.64
CG9	2.70
CG10	2.92
CG11	2.76
CG12	2.77

4.2.4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient) ที่ $100-500 \text{ }^\circ\text{C}$ ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกพบว่าถ้ายิ่งต่ำก็ทำให้ Thermal shock resistance สูงขึ้นดังนั้นต้องหาตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุด โดยจะต้องคำนึงถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างด้วย

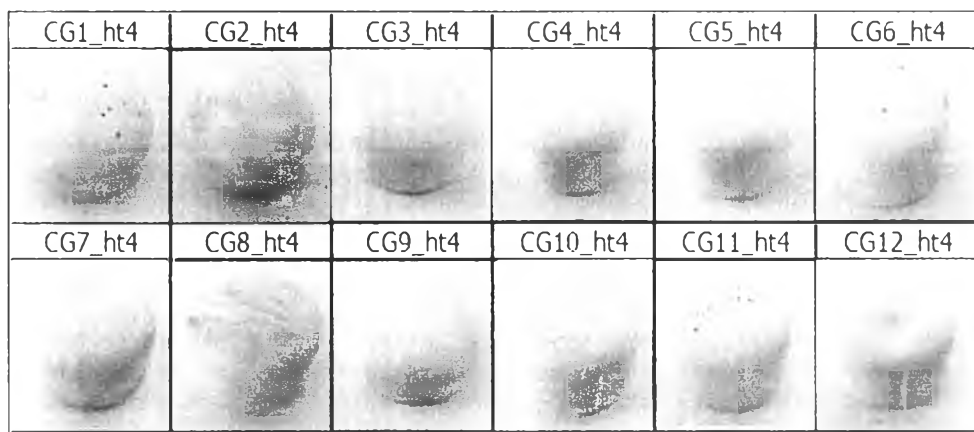
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิกของ CG ht1 ถึง ht3

COE ($\times 10^{-6}/K$) 100-500°C	Heat treatment1 850°C2h.950°C2h.	Heat treatment2 850°C2h.1050°C2h.	Heat treatment3 850°C2h.1100°C2h.
CG1	4.41	1.28	1.59
CG2	4.65	11.53	6.6
CG3	6.82	5.86	5.1
CG4	7.7	5.83	5.31
CG5	7.94	7.94	-
CG6	7.23	3.94	-
CG7	3.92	4.9	11.23
CG8	4.43	4.08	3.81
CG9	4.6	4.28	4.98
CG10	8.57	5.98	3.43
CG11	8.21	3.73	-
CG12	5.41	4.76	4.9

จากตารางที่ 4.5 CG7 ที่ทำเป็นกลาสเซรามิกถ้า Heat treatment ที่อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงขึ้นอย่างมากเพราะ CG7 เปลี่ยนจากแก้วเป็นเฟสควอตซ์ แต่ไม่เกิดเฟสคอร์เดียไรต์ ส่วน CG1 เมื่อ Heat treatment ภาวะที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับแก้วของ CG1 เพราะ CG1 ที่ Heat treatment ภาวะที่ 1 เกิดเฟสควอตซ์ แต่ถ้าเมื่ออุณหภูมิ Crystal growth temperature สูงขึ้นเป็น 1050 °C และ 1100 °C เป็น Heat treatment ภาวะที่ 2 และ Heat treatment ภาวะที่ 3 ตามลำดับ มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลงเพราะเกิดเฟสคอร์เดียไรต์ โดยสูตรที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดคือ CG1 ที่ Heat treatment ภาวะที่ 2 เท่ากับ $1.28 \times 10^{-6} / ^\circ C$

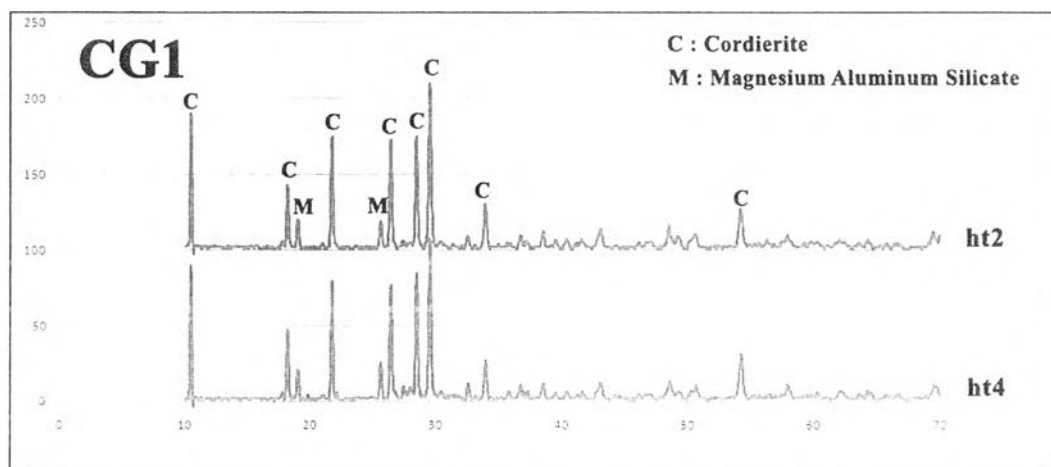
4.2.5 ผลของเวลาในการทำ Heat treatment ต่อสมบัติของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก - ผลการสังเกตสี

Heat treatment ภาวะที่ 4 (ht4) Nucleation temperature ที่ 850°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ Crystal growth temperature ที่ 1050°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นการเพิ่มเวลาจาก 2 ชั่วโมง เป็น 4 ชั่วโมงทำให้ได้สีที่เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นดังรูปที่ 4.14



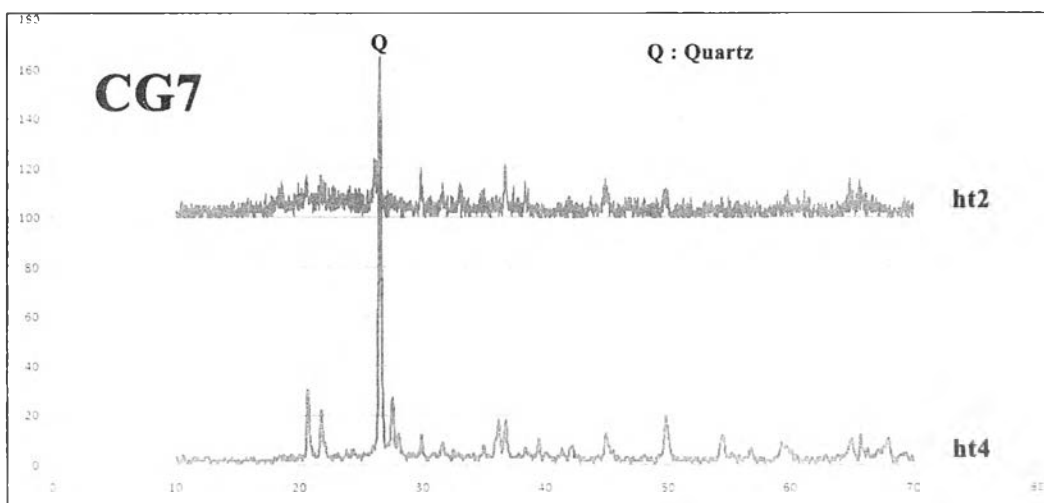
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก Heat treatment ht4 850°C 4 ชั่วโมง และ 1050°C 4 ชั่วโมง

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบทางเฟสของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG1

จากรูปที่ 4.15 เป็นการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเฟสของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG1 เฟสที่เกิดขึ้นเหมือนกันแตกต่างกันที่ Intensity ของ peak เพียงเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.16 แสดง CG7 เมื่อ ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 เฟสที่เกิดขึ้นเหมือนกันแต่ Intensity ของ peak ควอตซ์ของ ht4 สูงกว่า ht2 มาก



รูปที่ 4.16 องค์ประกอบทางเฟสของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG7

- ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient) ของกลาสเซรามิกของ ht4 เปรียบเทียบกับ ht2

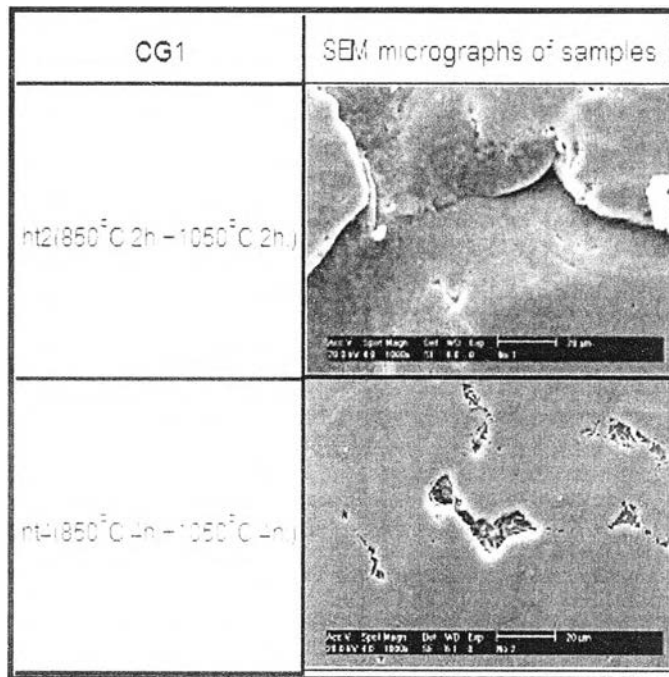
จากตารางที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิกระหว่าง ht4 กับ ht2 จะเห็นได้ว่า CG1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนภายใต้ภาวะของ ht4 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วน CG7 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนภายใต้ภาวะของ ht4 เพิ่มขึ้นมากซึ่งสอดคล้องกับ Intensity ของ peak ของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิกของ ht4 เปรียบเทียบกับ ht2

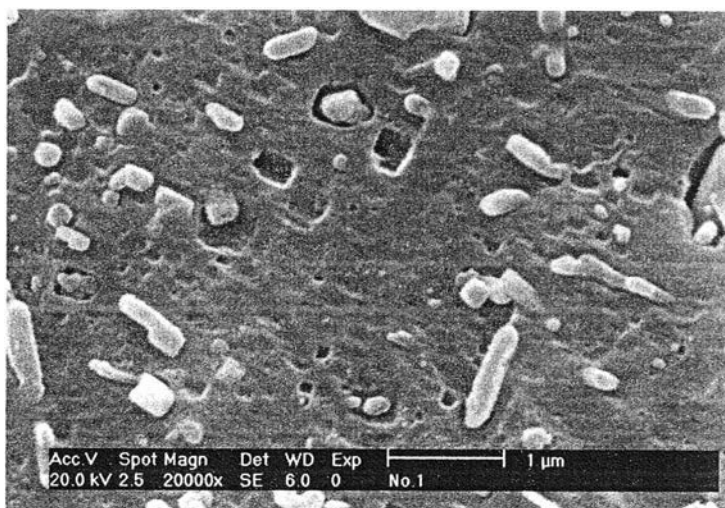
COE ($\times 10^{-6}/K$) 100-500°C	Heat treatment2 850°C2h.1050°C2h.	Heat treatment4 850°C4h.1050°C4h.
CG1	1.28	1.92
CG7	4.9	13.27

- ผลการวิเคราะห์ Scanning electron microscopy (SEM) ของกลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2

จากรูป 4.17 แสดงสัณฐานวิทยาของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG1 จะเห็นได้ว่า ht2 มีโครงสร้างที่ร้อนที่ผิว แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการทำ Heat treatment เป็น 850°C 4 ชั่วโมงและ 1050°C 4 ชั่วโมง ทำให้ผิวเรียบไม่ร้อนแต่มีรูพรุน

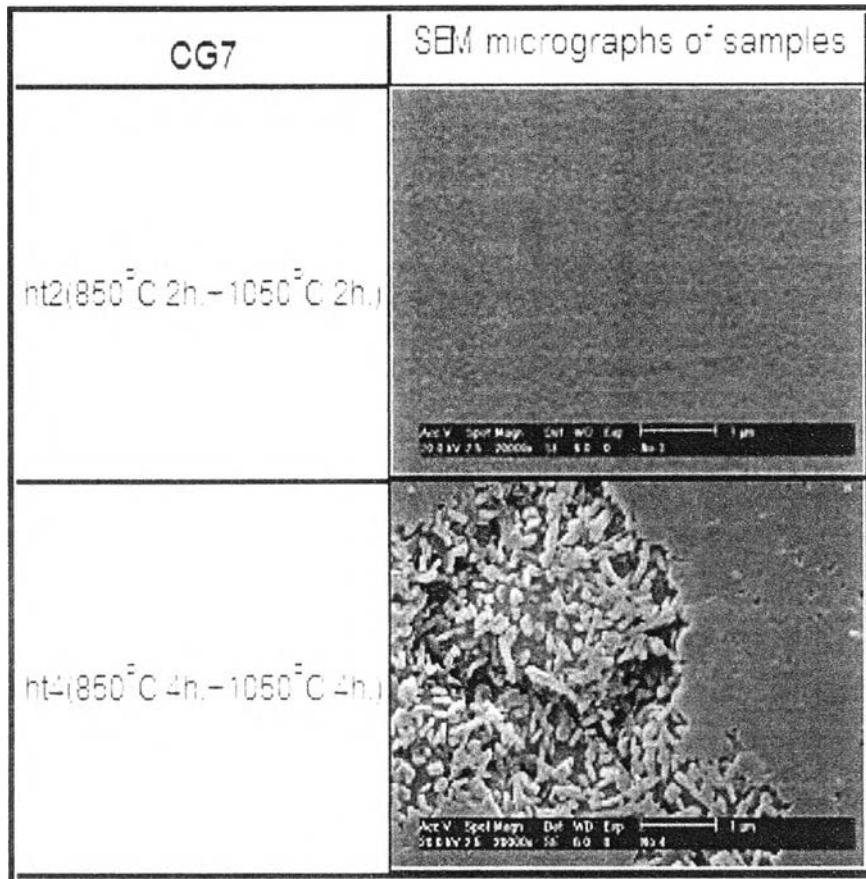


รูปที่ 4.17 SEM micrographs ของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG1







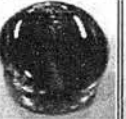

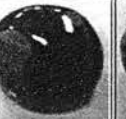
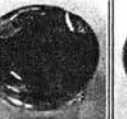
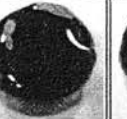
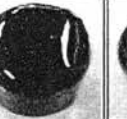
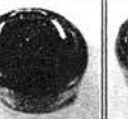






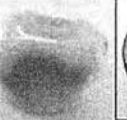













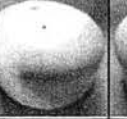












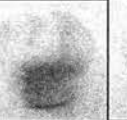









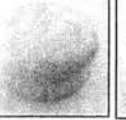
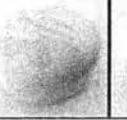




รูปที่ 4.18 SEM micrographs ของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก CG1 ht2

จากรูป 4.18 แสดงสัณฐานวิทยาของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก CG1 ht2 เกิดผลึกกระจายอยู่ซึ่งจากผลจากการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเฟสด้วย XRD เกิดเฟสของคอร์เดี่ยวไรต์เป็นเฟสหลัก



รูปที่ 4.19 SEM micrographs ของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG7

จากรูปที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาของคอร์เดี่ยวไรต์กลาสเซรามิก ht4 เปรียบเทียบกับ ht2 ของ CG7 จะเห็นได้ว่า CG7 ht2 ผลึกเกิดขึ้นเล็กมาก แต่ถ้าเพิ่มชั่วโมงการทำ Heat treatment เป็น 850°C 4 ชั่วโมงและ 1050°C 4 ชั่วโมง ก็เกิดผลึกของควอตซ์ โดยดูจากผลจากการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเฟสด้วย XRD เกิดเฟสของควอตซ์เป็นเฟสหลัก

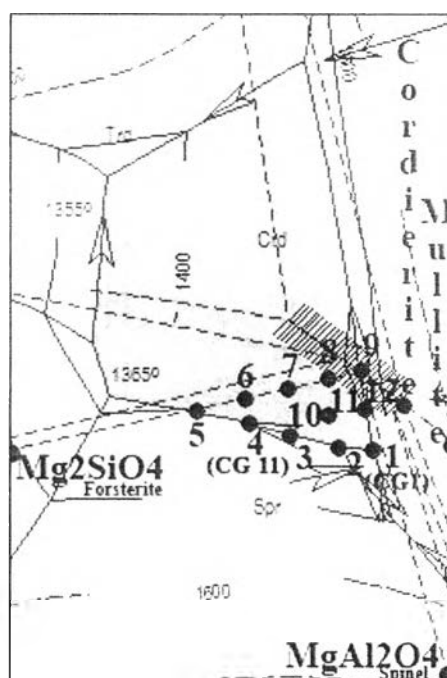
	CG1	CG2	CG3	CG4	CG5	CG6	CG7	CG8	CG9	CG10	CG11	CG12
Glass												
ht1 850°C 2h. 950°C 2h.												
ht2 850°C 2h. 1050°C 2h.												
ht3 850°C 2h. 1100°C 2h.												
ht4 850°C 4h. 1050°C 4h.												

รูปที่ 4.20 ตัวอย่างคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก CG1 ถึง CG12

4.3 การวิเคราะห์สมบัติของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ในไดอะแกรม Forsterite-spinel-cordierite ภายในขอบเขตของคอร์เดียไรต์

จากผลค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CG1ht2 ต่ำสุดคือ $1.28 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ และต่ำรองลงมาคือ CG11ht2 คือ $3.73 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ดังนั้นจึงสรุปว่าสูตรที่อยู่ในสามเหลี่ยม Forsterite-spinel-cordierite ภายใน boundary ของคอร์เดียไรต์จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

ในสามเหลี่ยม Forsterite-spinel-cordierite ภายใน boundary ของคอร์เดียไรต์ได้ทดลองทำตัวอย่างทั้งหมดอีก 12 จุด ตั้งแต่ CGn01 ถึง CGn12 ซึ่งมีจุด CGn12 เป็นจุด stoichiometric ของคอร์เดียไรต์ ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 Phase diagram ของระบบ $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ^[8]

ซึ่งมีวัตถุดิบที่ใช้แตกต่างจาก CG1 ถึง CG12 คือ เปลี่ยนดิน Kaolin Microbrite (FH95) จาก Skardon river kaolin PTY limited. ประเทศออสเตรเลีย เป็น หินสบู่ Phyrophillite จากบริษัท เซอมาส จำกัด จากตารางที่ 4.7 หินสบู่มีปริมาณ TiO_2 น้อยกว่า Kaolin มาก ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 แสดง % ออกไซด์โดยน้ำหนักจากสูตร CGn1 ถึง CGn12 จาก phase diagram ในสามเหลี่ยม Forsterite-spinel-cordierite และตารางที่ 4.9 แสดง % วัตถุดิบโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของ Kaolin และ หินสบู

	Kaolin Microbrite FH95	หินสบู Phyrophilite
SiO ₂	44.00	76.44
TiO ₂	2.00	0.12
Al ₂ O ₃	37.50	16.68
Fe ₂ O ₃	0.75	0.19
CaO	0.04	0.10
MgO	0.10	0.10
K ₂ O	0.13	0.19
Na ₂ O	0.36	0.10

ตารางที่ 4.8 สูตร CGn1 ถึง CGn12 % ออกไซด์โดยน้ำหนัก

Glass Sample	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)
CGn1	16.36	34.89	48.75
CGn2	17.25	33.85	48.90
CGn3	19.16	31.43	49.41
CGn4	20.58	29.37	50.05
CGn5	23.03	26.39	50.58
CGn6	20.22	28.46	51.32
CGn7	18.30	29.96	51.74
CGn8	16.70	31.20	52.10
CGn9	15.00	32.30	52.70
CGn10	17.21	32.12	50.67
CGn11	15.72	33.67	50.61
CGn12	13.86	35.23	50.91

ตารางที่ 4.9 สูตร CGn1 ถึง CGn12 % วัตุดิบโดยน้ำหนัก

Glass sample	ทัลค์ม (%)	หินสปู (%)	อะลูมินา (%)	ไททานเนียม (%)
CGn1	45.70	18.00	27.30	9.00
CGn2	48.20	16.10	26.70	9.00
CGn3	53.50	12.30	25.20	9.00
CGn4	57.50	9.70	23.80	9.00
CGn5	64.30	4.70	22.00	9.00
CGn6	56.40	12.00	22.60	9.00
CGn7	51.00	16.90	23.10	9.00
CGn8	46.50	21.00	23.50	9.00
CGn9	41.70	25.60	23.70	9.00
CGn10	48.00	18.20	24.80	9.00
CGn11	43.80	21.60	25.60	9.00
CGn12	38.60	26.20	26.20	9.00

หมายเหตุ TiO₂ ทำหน้าที่เป็น nucleating agent

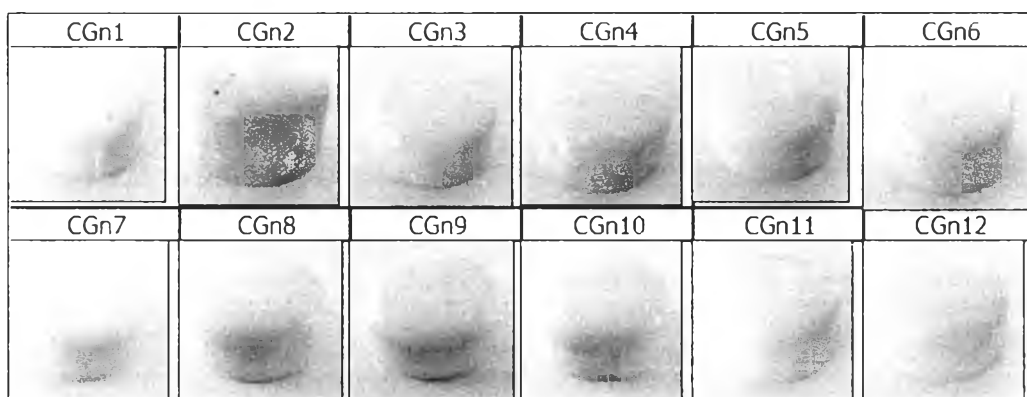
4.3.1 ผลการทดลองสำหรับ CGn1 ถึง CGn12 Heat treatment 2 (850 °C 2 ชั่วโมง 1050 °C 2 ชั่วโมง)

- ผลการสังเกตสี

การสังเกตเรื่องของสี และการเป็นเนื้อเดียวกันของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก จากรูปที่ 4.22 พบว่าสีของกลาสเซรามิกมีสีขาว-สีเทาอ่อน โดยเป็นเนื้อเดียวกัน

- ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient)

จากตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิกที่ต่ำที่สุดคือ CGn1-ht2, CGn2-ht2, CGn8-ht2, CGn9-ht2 และ CGn11-ht2 เท่ากับ $2.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $2.22 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $2.81 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $2.66 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ และ $2.80 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างของ CGn ที่ Heat treatment ht2 850 °C 2 ชม. และ 1050 °C 2 ชม.

จาก 12 จุดของ CGn ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn1-ht2 และ CGn2-ht2 ต่ำสุดซึ่งเป็นจุดที่ใกล้เคียงกับ CG1-ht2 แต่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CG1-ht2 ยังต่ำกว่า CGn1-ht2 และ CGn2-ht2 ซึ่งเป็นผลมาจาก CGn1-ht2 และ CGn2-ht2 สูตรผสมของทั้ง 2 สูตรมีปริมาณ TiO_2 ที่ลดลง

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิก CGn1 ถึง CGn12

CGn01-12 ht2	COE($\times 10^6$) 100-500°C
CGn01_ht2	2.79
CGn02_ht2	2.22
CGn03_ht2	6.55
CGn04_ht2	6.79
CGn05_ht2	4.72
CGn06_ht2	3.99
CGn07_ht2	3.44
CGn08_ht2	2.81
CGn09_ht2	2.66
CGn10_ht2	3.23
CGn11_ht2	2.80
CGn12_ht2	3.38

4.4 การวิเคราะห์สมบัติของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกที่เติม B_2O_3 และ เพิ่ม TiO_2

จากผลการทดลอง CGn ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของกลาสเซรามิกที่ต่ำที่สุดคือ CGn1-ht2, CGn2-ht2, CGn8-ht2, CGn9-ht2 และ CGn11-ht2 แต่ก็ยังสูงกว่าสูตร CG ดังนั้นจึงนำสูตรทั้ง 5 มาพัฒนาต่อ

งานวิจัยของ Nandi และ คณะ^[9] ศึกษาการใส่ Boron Oxide ในคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนให้ต่ำลง หลักการคือขนาดเล็กของ boron cation จะเข้าไปในช่องว่างของ lattice จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าการใช้ขนาดของ cation ที่ใหญ่กว่า และงานวิจัยของ Vladimir M. Fokin และคณะ^[14] ศึกษาปริมาณของ TiO_2 ที่มีผลต่อการเกิดนิวเคลียสบริเวณผิวหน้าและเนื้อของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก ซึ่งการเพิ่มปริมาณของ TiO_2 ซึ่งจะทำให้เกิดนิวเคลียสทั้งที่ผิวและในเนื้อของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก

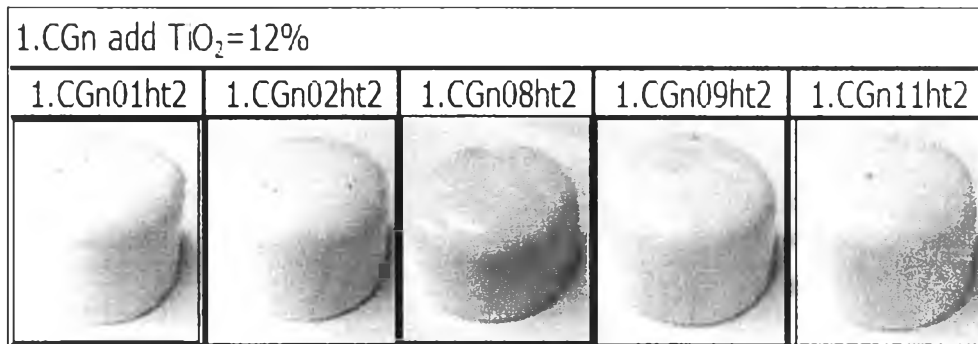
ดังนั้นจึงนำสูตร CGn1, CGn2, CGn8, CGn9 และ CGn11 มาเติม Boron Oxide และเพิ่ม TiO_2 โดยทำเป็น 4 แบบคือ

- เพิ่ม TiO_2 เป็น 12%
- เติม B_2O_3 0.5%
- เติม B_2O_3 1%
- เติม B_2O_3 0.5% และ เพิ่ม TiO_2 เป็น 12%

4.4.1 CGn เพิ่ม TiO_2 เป็น 12% คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2

- ผลการสังเกตสีของแก้ว

สูตร CGn01, CGn02, CGn08, CGn09 และ CGn11 ที่เผา Heat treatment 2 ($850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง และ $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ชั่วโมง) เมื่อเพิ่ม TiO_2 จาก 9% เป็น 12% มีผลต่อความหนืดของน้ำแก้วต่ำลงสามารถเทน้ำแก้วลงในแบบเหล็กได้ง่ายขึ้น เป็นทำให้สีเป็นเนื้อเดียวกันและมันแวว ยกเว้น CGn01_ht2 และ CGn11_ht2 เมื่อเพิ่ม TiO_2 เป็น 12% ซึ่งความหนืดสูงกว่าสูตรอื่นเป็นผลให้ความเงาแววกก็ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างของ CGn เพิ่ม TiO₂ เป็น 12% ที่ Heat treatment ht2 850 °C 2 ชม. และ 1050 °C 2 ชม.

ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient)

จากตารางที่ 4.11 สูตร CGn01_ht2 และ CGn11_ht2 เป็นสูตรที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าสูตรอื่นแสดงว่าการเพิ่ม TiO₂ จาก 9% เป็น 12% ถ้าสูตรที่ความหนืดของน้ำแก้วสูง, ความมันวาวสูง ก็จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงขึ้น

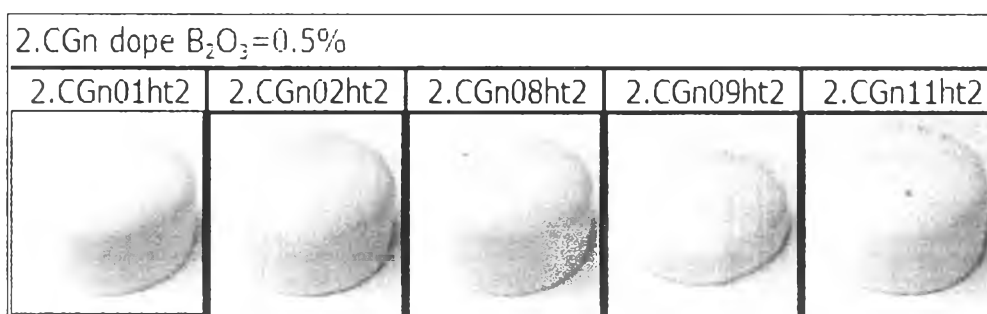
ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn เมื่อ TiO₂ เพิ่มเป็น 12%

CGn เมื่อ TiO ₂ เพิ่มเป็น 12%	COE(X10 ⁶) 100-500°C
1.CGn01_ht2	2.52
1.CGn02_ht2	11.29
1.CGn08_ht2	11.45
1.CGn09_ht2	11.06
1.CGn11_ht2	2.78

4.4.2 CGn เติม B_2O_3 0.5% คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2

-ผลการสังเกตสีของแก้ว

สีของกลาสเซรามิก CGn เติม B_2O_3 0.5% เปลี่ยนแปลงเรื่องความมันแววเพิ่มเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ CGn ก่อนเติม แสดงดังรูปที่ 4.24 ส่วนความหนืดของน้ำแก้วก็ต่ำลงเพียงเล็กน้อยเช่นกัน



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างของ CGn เติม B_2O_3 0.5% ที่ Heat treatment ht2

- ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient)

เมื่อเติม B_2O_3 0.5% ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนลดลงทุกตัวเมื่อเทียบกับสูตร CGn โดยเฉพาะ 2.CGn01_ht2 และ 2.CGn02_ht2 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลงมาก เท่ากับ $1.42 \times 10^{-6} / ^\circ C$ และ $1.76 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ตามลำดับซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.12

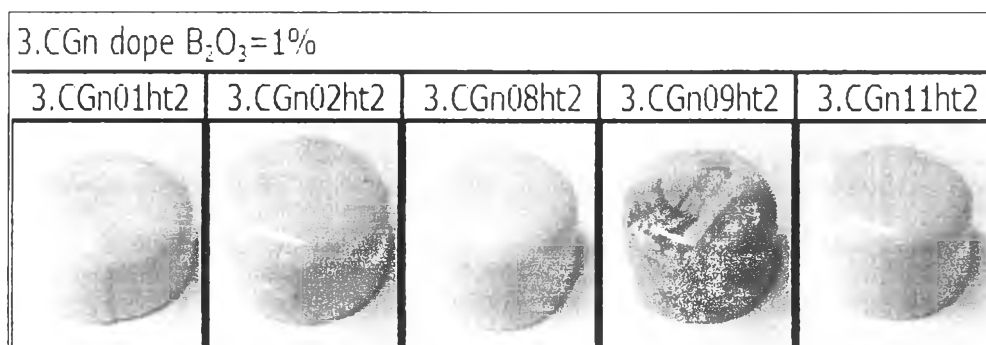
ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn B_2O_3 0.5%

CGn dope $B_2O_3=0.5\%$	COE($\times 10^{-6}$) 100-500 $^\circ C$
2.CGn01_ht2	1.42
2.CGn02_ht2	1.76
2.CGn08_ht2	2.83
2.CGn09_ht2	2.17
2.CGn11_ht2	2.58

4.4.3 เดิม B_2O_3 1% คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2

- ผลการสังเกตสีของแก้ว

สูตร CGn เดิม B_2O_3 1% ที่ Heat treatment ht2 850 °C 2 ชม. และ 1050 °C 2 ชม. มีผลต่อความมันแวอย่างมาทุกสูตร ส่วนสีเป็นเนื้อเดียวกันยกเว้น CGn09_ht2 ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ตัวอย่างของ CGn เดิม B_2O_3 1% ที่ Heat treatment ht2 ชม.

- ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient)

จากตารางที่ 4.13 เมื่อเติม B_2O_3 1% ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงขึ้นทุกตัวเมื่อเทียบกับสูตร CGn เดิม B_2O_3 0.5% ทำให้สรุปได้ว่าการเติม B_2O_3 1% เป็นการเติมที่มากเกินไป

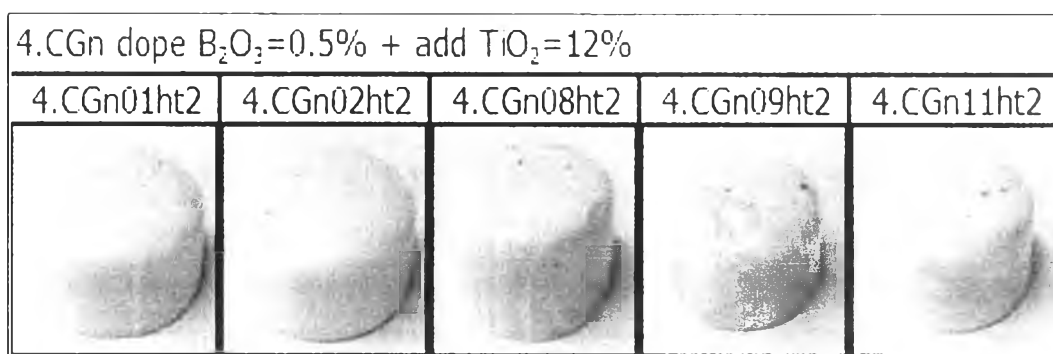
ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn B_2O_3 1%

CGn dope $B_2O_3=1\%$	COE($\times 10^6$) 100-500°C
3.CGn01_ht2	5.98
3.CGn02_ht2	6.26
3.CGn08_ht2	7.71
3.CGn09_ht2	6.27
3.CGn11_ht2	6.95

4.4.4 เติม B_2O_3 0.5% และ เพิ่ม $TiO_2=12\%$ คือ CGn01ht2, CGn02ht2, CGn08ht2, CGn09ht2 และ CGn11ht2

-ผลการสังเกตสีของแก้ว

สูตรทุกสูตรมีสีขาวอมเทาและกึ่งเงากึ่งด้าน ส่วนความหนืดของน้ำแก้วต่ำดีสามารถเทน้ำแก้วได้ง่ายกว่า เพราะเมื่อเทน้ำแก้วแล้วแก้วจะไม่แข็งตัวทันทีจะมีช่วงเวลาอ่อนตัว หรือ Working range นานขึ้นทำให้การขึ้นรูปของแก้วทำได้ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ตัวอย่างของ CGn เติม B_2O_3 0.5% และ เพิ่ม TiO_2 เป็น 12% ที่ Heat treatment ht2

- การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient)

จากตารางที่ 4.14 สูตรที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดคือ 4.CGn02_ht2 เท่ากับ $1.59 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ 2.CGn01_ht2 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกันแต่ความหนืดของ 4.CGn02_ht2 สามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่า หรือ working range นานขึ้น

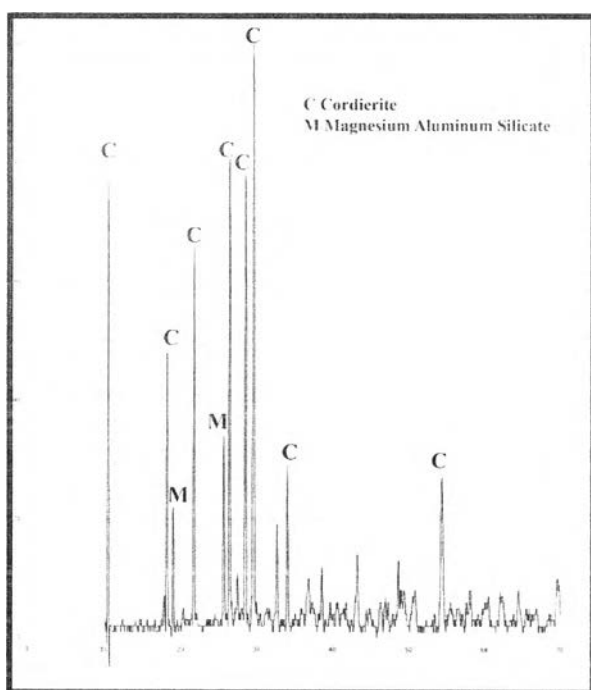
ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ CGn B_2O_3 0.5%+ TiO_2 12%

CGn dope $B_2O_3=0.5\%+TiO_2$ 12%	COE($\times 10^{-6}$) 100-500 $^\circ C$
4.CGn01_ht2	2.03
4.CGn02_ht2	1.59
4.CGn08_ht2	2.30
4.CGn09_ht2	3.27
4.CGn11_ht2	2.39

จากผลการทดลองเติม B_2O_3 ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลง โดยเติมในจำนวนเพียงเล็กน้อย ($B_2O_3=0.5\%$) ก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลงมากกว่าการเติมในปริมาณมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nandi และคณะ^[9] ที่กล่าวมาคือการเติม B_2O_3 จำนวนเพียงเล็กน้อยคือเติม B_2O_3 เท่ากับ 1% ซึ่งเป็นจำนวนน้อยที่สุดในการทดลองทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำที่สุดเช่นกัน

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วย XRD ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิกของ 4.CGn02_ht2

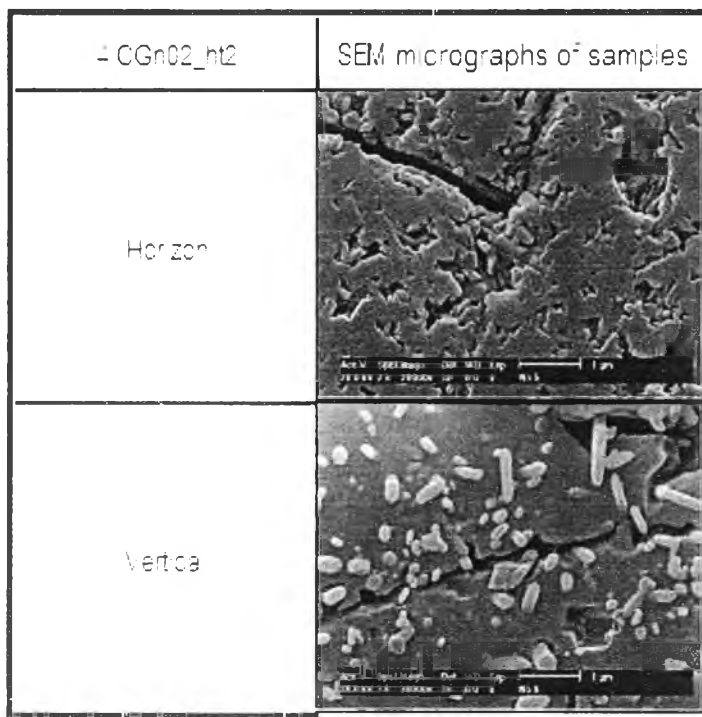
จากรูปที่ 4.27 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของ 4.CGn02_ht2 ซึ่งแสดงว่าเฟสหลักคือ คอร์เดียไรต์



รูปที่ 4.27 องค์ประกอบทางเฟสของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก 4.CGn02_ht2

- ผลการวิเคราะห์ Scanning electron microscopy (SEM) ของ 4.CGn02_ht2

จากรูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก 4.CGn02_ht2 ซึ่งถ้าเป็นแนวตั้งจะเกิดผลึกคอร์เดียไรต์กระจายอยู่ใน glassy phase แต่ถ้าในแนวนอนจะเกิดผลึกคอร์เดียไรต์อัดแน่น



รูปที่ 4.28 SEM micrographs ของคอร์เดียไรต์กลาสเซรามิก 4.CGn02_ht2 แนวตั้ง
เปรียบเทียบกับแนวนอน

-การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ของ 4.CGn02_ht2 จากผลของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ของ CGn B₂O₃ 0.5% และ TiO₂ 12% จะได้ 4.CGn02_ht2 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดเท่ากับ $1.59 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ จึงนำมาทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 45 นาทีแล้วนำไปแช่น้ำ 20 °C และนำมาตรวจสอบการร้าวด้วย Methylene blue dye ถ้าไม่ร้าวทำซ้ำอีก 4 ครั้ง และเมื่อไม่ร้าวทั้ง 5 ครั้งจึงเพิ่มอุณหภูมิการอบเป็น การอบเป็น 450 °C และ 500 °C ผลการทดลองตามตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของ 4.CGn02_ht2

	400°C	450°C	500°C
4.CGn02_ht2	ไม่ร้าว	ไม่ร้าว	ไม่ร้าว

สรุปผลการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของ 4.CGn02_ht2 ผ่าน 500 °C