



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิ
การเผาผนึกของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต
Effect of Alumina to Cubic Zirconia Ratio on Mechanical Properties and
Sintering Temperature of Alumina-Cubic Zirconia Composites

ชื่อนิสิต นางสาวชวนากร จันทร์หล่น เลขประจำตัว 5833216923
นางสาวเสาวลักษณ์ รัตนวงศ์ เลขประจำตัว 5833446923

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2561

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

ผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเผาผนึก
ของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

1.นางสาวชวนากร จันทร์หล่น เลขประจำตัว 5833216923

2.นางสาวเสาวลักษณ์ รัตนวงศ์ เลขประจำตัว 5833446923

อนุมัติโดย



(ผศ.ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผศ.ดร.ชานากร วาสนาเพียรพงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม



(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

ปีการศึกษา 2561

หัวข้องานวิจัย	ผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเผาผนึกของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต
โดย	นางสาวชวนากร จันทร์หล่น นางสาวเสาวลักษณ์ รัตนวงศ์
สาขาวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์ ดร.จรัสพร มงคลขจิต
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น มีความทนไฟสูง มีความแข็งสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่างได้ดี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม อะลูมินายังมีค่าความต้านทานการแตกร้าวค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจนำคิวบิกเซอร์โคเนียซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเจียรไนเพชรคิวบิกเซอร์โคเนียมาผสมกับอะลูมินาเป็นวัสดุคอมโพสิต เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เตรียมได้ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาต่อคิวบิกเซอร์โคเนีย ได้แก่ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 และอุณหภูมิการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 1500 1550 1600 และ 1650 องศาเซลเซียสต่อสมบัติของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่าการเติมคิวบิกเซอร์โคเนียไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้ ซึ่งอาจเกิดจากการที่คิวบิกเซอร์โคเนียมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคอะลูมินา ทำให้เมื่อเติมคิวบิกเซอร์โคเนียในปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการเผาผนึกของชิ้นงานลดลง ทำให้ชิ้นงานที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลลดลง โดยชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดคือ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาต่อคิวบิกเซอร์โคเนียเท่ากับ 90:10 ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เตรียมได้มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 98.04 ± 1.91 มีค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 450.96 ± 34.30 เมกะพาสคัล มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์เท่ากับ 16.35 ± 0.70 จิกะพาสคัล และมีค่าความต้านทานการแตกร้าวเท่ากับ 4.83 ± 0.46 เมกะพาสคัล-เมตร^{1/2}

Title	Effect of Alumina to Cubic Zirconia Ratio on Mechanical Properties and Sintering Temperature of Alumina-Cubic Zirconia Composites
Authors	Miss Chavanakorn Janlon Miss Saowaluck Rattanawong
Department	Materials Science
Advisor	Asst. Prof. Dr. Karn Serivalsatit
Co-advisor	Asst. Prof. Dr. Thanakorn Wasanapiarnpong Dr. Charusporn Mongkolkachit
Academic Year	2018

Abstract

Alumina has been used in many industries due to its desirable properties such as high melting point, high mechanical strength and high chemical resistance. However, alumina has low fracture toughness. Therefore, this research focused on using cubic zirconia waste from cubic zirconia diamond cutting to prepare alumina-cubic zirconia composite in order to improve mechanical properties of the composite. The alumina-cubic zirconia composites with alumina to cubic zirconia weight ratio of 100:0, 90:10, 80:20, and 70:30 were prepared and sintered at 1450, 1500, 1550, 1600 and 1650 °C for 2 hours. The results showed that the addition of cubic zirconia waste could not enhance mechanical properties of alumina-cubic zirconia composite. This might be caused by large particle size of cubic zirconia waste deteriorated sinterability of the samples. Therefore, the alumina-cubic zirconia composite with the optimal properties was the sample with alumina to cubic zirconia ratio of 90:10, sintered at 1600 °C for 2 hours. The relative density, flexural strength, Vicker's hardness, and fracture toughness of the composite were 98.04 ± 1.91 %, 450.96 ± 34.30 MPa, 16.35 ± 0.70 GPa and 4.83 ± 0.46 MPa·m^{1/2}, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่านดังต่อไปนี้

- 1) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่ให้คำปรึกษาและคอยแนะนำในสิ่งที่เกี่ยวข้องกับผู้วิจัย
- 2) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ และดร.จรัสพร มงคลขจิต อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ผู้ที่ให้คำปรึกษาและคอยแนะนำในสิ่งที่เกี่ยวข้องกับผู้วิจัย
- 3) คณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย
- 4) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยสนับสนุนเงินทุนในงานวิจัย
- 5) ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติตามสัญญาสนับสนุนทุนสนับสนุนการศึกษาวิจัยเพื่อจัดทำปริญญาบัตรโครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี เลขที่ SCA-CO-2561-7232-TH
- 6) ทำนี่ยขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนาม เช่น พี่ประจำศูนย์เครื่องมือต่างๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ รวมถึงกลุ่มคนที่คอยดูแลให้กำลังใจในการทำงานจนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ชวนากร จันทร์หล่น
เสาวลักษณ์ รัตน์วงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials)	3
2.1.2 อะลูมินา.....	3
2.1.3 เซอร์โคเนีย.....	5
2.1.3.1 Fully Stabilized Zirconia (FSZ)	6
2.1.3.2 Tetragonal Zirconia Polycrystal (TZP).....	7
2.1.3.3 Partially Stabilized Zirconia (PSZ).....	8
2.1.3.3.1 กระบวนการเกิดความต้านทานต่อการแตกร้าวใน Partially Stabilized Zirconia (PSZ)	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.2.1 การเผาผนึกและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมินาและวัสดุผสมระหว่างอะลูมินากับ เซอร์โคเนีย	11
2.2.2 การทนทานต่อการขีดสีของการหล่อวัสดุคอมโพสิตระหว่างอะลูมินากับ เซอร์โคเนีย	14
2.2.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างอะลูมินา-เซอร์โคเนียโดยใช้ผงวัตถุดิบราคาถูก	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	17
3.1 วัสดุและสารเคมี	17
3.1.1 ผงอะลูมินา	17
3.1.2 ผงเซอร์โคเนีย	17
3.2 วิธีการทดลอง	18
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง	18
3.2.2 การเผาผนึก	19
3.2.3 การทดสอบความหนาแน่น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และความพรุนตัว ของชิ้นงาน	19
3.2.4 การทดสอบการหดตัวหลังเผา	20
3.2.5 การทดสอบความต้านทานแรงดัด	21
3.2.6 การทดสอบความแข็ง	22
3.2.7 การทดสอบต้านทานการแตกร้าว	22
3.2.8 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	25
4.1 ผลของขนาดผงอะลูมินาต่อการเผาผนึก	25
4.2 สมบัติของชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450- 1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	26
4.3 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติของคิวบิกเซอร์โคเนีย	29
4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต	31
4.5 ความแข็งและความต้านทานต่อการแตกร้าวของชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต หลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก ผลจากเทคนิควิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Distribution, PSD)	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข ผลจากเทคนิควิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD).....	47
ภาคผนวก ค สมบัติของชิ้นงานอะลูมินาหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	49
ภาคผนวก ง สมบัติของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1450 -1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	52
ภาคผนวก จ สมบัติของชิ้นงานควิบิคเซอร์โคเนียหลังผ่านการเผาผนึกอุณหภูมิ 1450 -1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	53
ภาคผนวก ฉ สมบัติของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง	56

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น	17
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของอะลูมินาและควิวิกเซอร์โคเนีย.....	18
ตารางที่ 4.1 สมบัติของชิ้นงานอะลูมินาหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	25
ตารางที่ 4.2 สมบัติของชิ้นงานควิวิกเซอร์โคเนียหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	30
ตารางที่ 4.3 สมบัติของชิ้นงานอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง	37

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะลูมินา.....	4
รูปที่ 2.2 กระบวนการเบเยอร์.....	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซอร์โคเนีย.....	5
รูปที่ 2.4 รูปร่างคิวิกเซอร์โคเนียหรือเพอร์รัสเซีย.....	6
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของ Y_2O_3 ใน ZrO_2	7
รูปที่ 2.6 ผลของปริมาณสารสร้างความเสถียรกับขนาด Critical Grain Size.....	8
รูปที่ 2.7 แผนภูมิเฟสของแมกนีเซียมในเซอร์โคเนีย.....	9
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดความต้านทานการแตกร้าวโดยอาศัยการเปลี่ยนเฟส.....	10
รูปที่ 2.9 ขนาดเกรนเฉลี่ยของอะลูมินาและอะลูมินา-เซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อุณหภูมิการเผาผนึกต่างๆ	12
รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่างๆที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส.....	13
รูปที่ 2.11 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานอะลูมินาและชิ้นงานอะลูมินา-เซอร์โคเนีย.....	14
รูปที่ 2.12 ภาพ SEM ของตัวอย่างก่อนทดสอบการขัดสี.....	14
รูปที่ 2.13 ภาพ SEM ของตัวอย่างหลังทดสอบการขัดสีที่มุมตกกระทบ 30 องศา.....	15
รูปที่ 3.1 กราฟข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นตัวอย่าง.....	19
รูปที่ 3.2 ลักษณะการทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งด้วยเทคนิค Biaxial-flexure strength-test flexure ตามมาตรฐานASTM F 394 -78.	21
รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	25
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานอะลูมินา-คิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	27
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานอะลูมินา-คิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	27
รูปที่ 4.3 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานอะลูมินา-คิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึก ที่อุณหภูมิ1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	28
รูปที่ 4.4 ความทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงานอะลูมินา-คิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึก ที่อุณหภูมิ1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง	29
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เผาผนึกที่ 1550 องศาเซลเซียส	31
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส	32
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 100:0	33
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 90:10	34
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 80:20	35
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 70:30	36
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส	32

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอะลูมินา (alumina; Al_2O_3) เป็นวัสดุเซรามิกที่ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าความแข็งสูง มีความหนาแน่นสูง มีความต้านทานต่อการขีดสีและสึกกร่อนสูง ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น ใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผาและเตาหลอม วัสดุขัดถู ลูกบิดและผนังกรุหม้ออบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก ถ้วยเผาสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี หัวฟันทรายสำหรับงานตกแต่งผิวโลหะ แผ่นรองวงจรไฟฟ้ารวมสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หัวเทียนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ ใช้ทำฝาครอบหลอดไฟโซเดียมที่ให้ความสว่างสูง และยังใช้เป็นชิ้นส่วนของอวัยวะทดแทน เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น

คุณสมบัติดังกล่าวนี้เนื่องมาจากโครงสร้างของอะลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าวต้องใช้พลังงานสูง ทำให้อะลูมินามีความแข็งแรงมาก ซึ่งเราสามารถนำเอาวัสดุเซรามิกชนิดนี้มาใช้เป็นวัสดุสำหรับใช้ขัดสี ตัด บด และขัดถูวัสดุอื่นที่มีความแข็งน้อยกว่าได้ นอกจากนั้นแล้วอะลูมินายังทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่างๆ ได้ดีอย่างยิ่ง แต่อะลูมินามีความต้านทานต่อการแตกร้าว (fracture toughness) ต่ำ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก จึงทำให้อะลูมินามีข้อบกพร่องในเรื่องการแตกหักเสียหายตามมาภายหลัง

มีงานวิจัยมากมายที่ค้นคว้าเพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการแตกร้าวของวัสดุอะลูมินาเซรามิก ซึ่งพบว่าการเติมเซอร์โคเนียที่อยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (partially stabilized zirconia; PSZ) ซึ่งประกอบด้วย MgO ร้อยละ 9 โดยโมล ในโครงสร้าง จะทำให้อะลูมินาเซรามิกมีความต้านทานต่อการแตกร้าวเพิ่มขึ้นโดยอาศัยการเปลี่ยนเฟสของเซอร์โคเนียที่มีโครงสร้างเตตระโกนอล ($t-ZrO_2$) เป็นเซอร์โคเนียโครงสร้างมอนอกลิติก ($m-ZrO_2$) โดยในกรณีนี้เซอร์โคเนียที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของอะลูมินา เซอร์โคเนียเหล่านี้จะสามารถคงตัวอยู่ในสถานะกึ่งเสถียรของ $t-ZrO_2$ โดยกระบวนการการต้านทานต่อการแตกร้าวจากการเปลี่ยนเฟสจะเริ่มขึ้นเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน รอยร้าวนี้จะส่งผลทำให้บริเวณปลายรอยร้าว (crack tip) เกิดแรงเค้น ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะทำให้ เซอร์โคเนียที่อยู่ในสถานะกึ่งเสถียรของ $t-ZrO_2$ เปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของ $m-ZrO_2$ ซึ่งผลของการเปลี่ยนเฟสนี้จะทำให้เซอร์โคเนียเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยจะขยายตัวประมาณร้อยละ 3 ส่งผลให้เกิดแรงกดบริเวณปลายของรอยร้าว จึงทำให้อะลูมินาไม่สามารถวิงต่อไปได้

งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาการนำเซอร์โคเนียที่มีโครงสร้างคิวบิก ($c\text{-ZrO}_2$) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเจียระไนเพชรคิวบิกเซอร์โคเนียมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาเซรามิก เนื่องจาก $c\text{-ZrO}_2$ มีการขยายตัวทางความร้อนสูง เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเป็นรอยร้าวเล็กๆ ครอบคลุมของ $c\text{-ZrO}_2$ ซึ่งรอยร้าวนี้เองจะเป็นตัวช่วยในการกระจายแรงเค้นจากปลายรอยร้าวที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเกิดการแตกร้าว ซึ่งคาดว่าจะช่วยสามารถทำให้วัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียที่เตรียมได้มีความต้านทานต่อการแตกร้าวที่ดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเผาผนึกของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเผาผนึกของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาผลของปริมาณคิวบิกเซอร์โคเนียที่มีต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเผาผนึกของอะลูมินา-เซอร์โคเนียคอมโพสิต โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาต่อคิวบิกเซอร์โคเนีย ได้แก่ 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 และอุณหภูมิการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450 1500 1550 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส และได้ศึกษาโดยทำการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่น (Density) มีค่าความต้านแรงดัด (Flexural Strength) ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความต้านทานการแตกร้าว (Fracture toughness) รวมถึงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของชิ้นงานที่เตรียมได้ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้ดีขึ้น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเผาผนึกของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

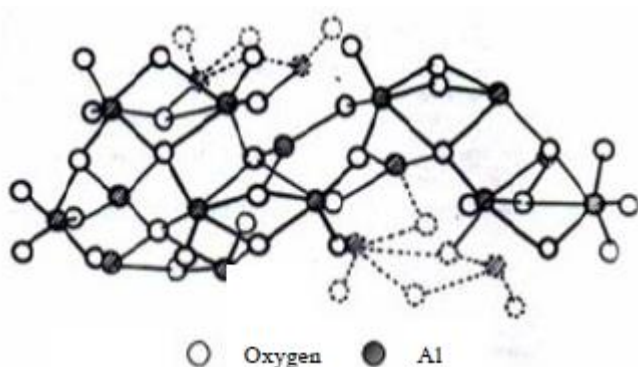
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials)

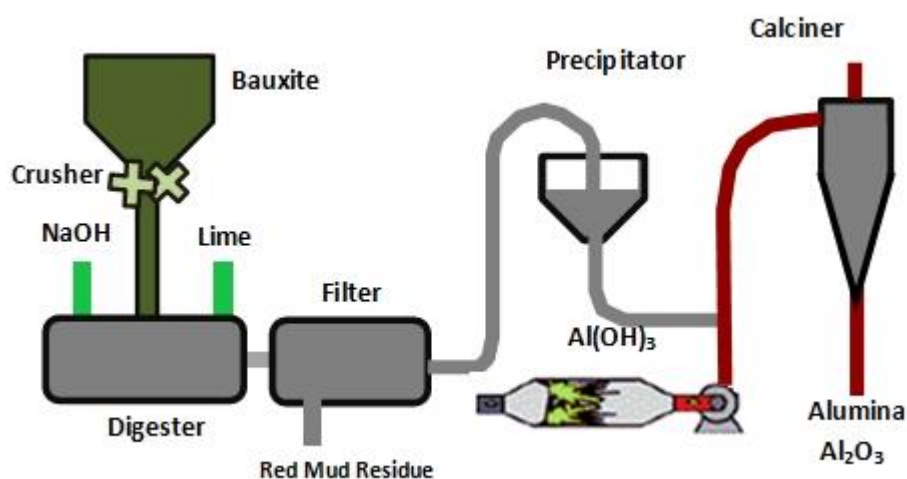
หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ การจำแนกวัสดุเชิงประกอบจะจำแนกตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์¹ โดยสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

2.1.2 อะลูมินา

อะลูมินามีชื่อทางเคมีว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ สูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 พบในธรรมชาติซึ่งอยู่ในรูปของแร่คอร์ันดัม (corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีสิ่งเจือปนในโครงสร้างของอะลูมินาเล็กน้อย จะทำให้เกิดสีต่างๆ ทำให้มีความสวยงามมากขึ้น กลายเป็นแร่ที่มีค่า เช่น สีแดงของทับทิมเกิดจากมีธาตุโครเมียมอยู่ในเนื้ออะลูมินา เป็นต้น โครงสร้างของอะลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าวต้องใช้พลังงานสูง ทำให้อะลูมินามีความแข็งแรงสูง² นอกจากนั้นแล้วอะลูมินามีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2,030 องศาเซลเซียส และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.4 – 4.0 ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวของอะลูมินาที่นอกจากจะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิก เพื่อให้เกิดความแข็งแรงมากขึ้นแล้ว ยังสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น ใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผาและเตาหลอม วัสดุขัดถู ลูกบิดและผนังกรูหม้ออบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก ถ้วยเผาสาร (crucible) สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี หัวฟันทรายสำหรับงานตกแต่งผิวโลหะ แผ่นรองวงจรไฟฟ้ารวม (IC) สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หัวเทียนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ ใช้ทำฝาครอบหลอดไฟโซเดียมที่ให้ความสว่างสูง และยังใช้เป็นชิ้นส่วนของอวัยวะทดแทน เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น

รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะลูมินา³

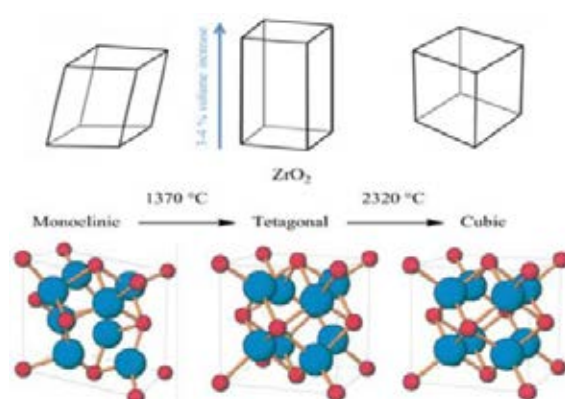
กระบวนการผลิตอะลูมินาในอุตสาหกรรมผลิตขึ้นจากร่วมบ็อกไซต์ (Bauxite) โดยกระบวนการที่มีชื่อว่า กระบวนการของเบเยอร์ (Bayer process) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน และเปลี่ยนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นอะลูมินา โดยอะลูมินาที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ มากกว่าร้อยละ 90 ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโลหะอะลูมิเนียม ส่วนที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 10 นำไปใช้ในรูปของอะลูมินาโดยตรง ซึ่งกระบวนการเบเยอร์มีขั้นตอน คือ ล้างร่วมบ็อกไซต์ให้สะอาด ตากแห้ง บดละเอียด ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ (NaOH) ในตู้อบ ได้สารละลายโซเดียมอะลูมิเนต (sodium aluminate; NaAlO_2) สารที่เจือปนในร่วมบ็อกไซต์ เช่น เหล็ก ซิลิกา จะไม่ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟและตกเป็นตะกอนสีแดง (red mud) กรองสารละลายออกแล้วทิ้งสารละลายไว้จนเกิดตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide; $\text{Al}(\text{OH})_3$) กรองเอาตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ออก แล้วนำไปเผาที่หินปูนในเตาเผาแบบหมุนชนิดเดียวกับที่ใช้เผาซีเมนต์ (rotary kiln) เพื่อให้สารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สลายตัวเป็นสารอะลูมินาและให้ไอน้ำออกมา⁴ กระบวนการผลิตสามารถสรุปดังที่รูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 กระบวนการเบเยอร์⁵

2.1.3 เซอร์โคเนีย

เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (zirconium oxide, ZrO_2) หรือเซอร์โคเนีย (zirconia) เป็นสารที่มีผลึกสีขาว มีสมบัติเป็นกรด มีความถ่วงจำเพาะ 4.2 ถึง 4.6 มีจุดหลอมละลายตัว 1,600–1,800 องศาเซลเซียส เมื่อเจือสารบางชนิด สามารถนำไปสังเคราะห์ให้มีสีต่างๆ ใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเพชรพลอย เซอร์โคเนียมีความแข็งระดับ 8.5 ตามสเกลของโมส์ (Mohs's scale) ไม่ละลายน้ำแต่ละลายในกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid; HF) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3) และกรดเกลือร้อน (hydrochloric acid; HCL)

เซอร์โคเนียจัดเป็นวัสดุประเภทเซรามิก โดยมีโครงสร้างมอнокlinik (Monoclinic) ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเปลี่ยนเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) และคิวบิก (Cubic) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.3 การที่โครงสร้างลูกบาศก์เปลี่ยนเป็นเตตระโกนอลและมอнокlinik เมื่อเย็นตัวลงทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นและเกิดความเครียด ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการเติมออกไซด์ของโลหะบางตัวเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เสถียรขึ้น ได้แก่ อิตเทรียมออกไซด์ (Yttrium Oxide; Y_2O_3) ซีเรียมออกไซด์ (Cerium Oxide; Ce_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide; CaO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide; MgO)⁶



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซอร์โคเนีย⁷

โดยสารดังกล่าวนี้จะทำให้เซอร์โคเนียสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องโดยจะไปทำให้โครงสร้างของเซอร์โคเนียเสถียรในรูปเตตระโกนอลหรือคิวบิก การเติมสารสร้างความเสถียรที่ต่างชนิดและปริมาณที่ต่างกันจะทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะความต่างของโครงสร้างจุลภาคได้เป็น 3 ลักษณะ คือ Fully Stabilized Zirconia (FSZ) Tetragonal Zirconia Polycrystal (TPZ) และ Partially Stabilized Zirconia (PSZ)

2.1.3.1 Fully Stabilized Zirconia (FSZ)

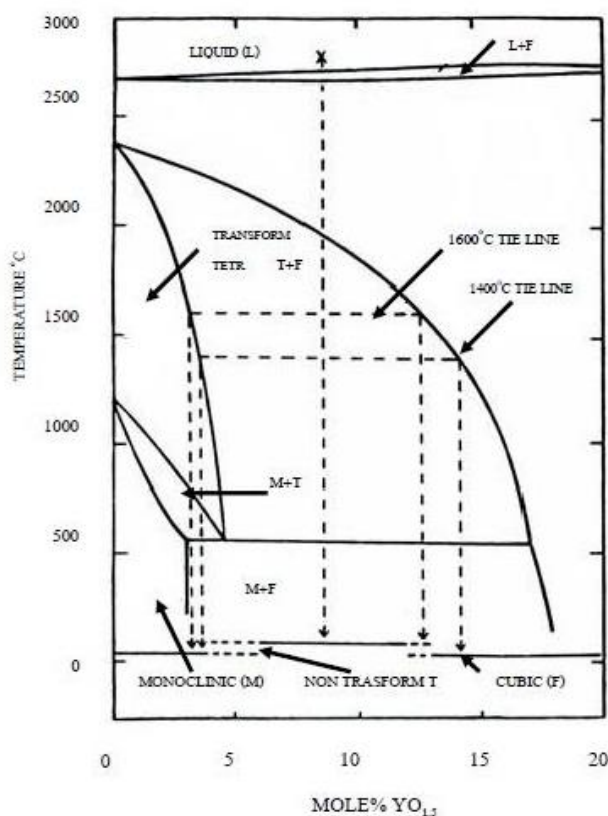
คือ เซอร์โคเนียที่เสถียรอยู่ในเฟสคิวบิกทั้งหมด รู้จักกันในชื่อของเพเซอร์คิวบิกเซอร์โคเนีย (Cubic Zirconia) หรือเรียกสั้นๆว่า เพชร CZ มีชื่อทางเคมีคือ Zirconium Oxide หรือ ZrO_2 ถือเป็นสารที่หาได้ยากตามธรรมชาติ แต่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปในฐานะของสารสังเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับเพชร แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งผลจากการสังเคราะห์จะได้สารที่แข็ง ไร้น้ำหนัก และมักจะไม่มีสี นอกจากนี้จะเติมเข้าไปเพื่อความสวยงาม ซึ่ง CZ เป็นเพชรที่มนุษย์สร้างขึ้นมาจากผงเซอร์โคเนีย โดยวิธีการที่เรียกว่า “Skull Metting” ผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกโดยกลุ่มของนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ด้วยเหตุนี้จึงถูกเรียกว่า เพชรรัสเซีย พลอยสังเคราะห์ชนิดนี้มีประกายและการกระจายแสงดีเกือบเท่าเพชร ดุคล้ายเพชรมากที่สุด ในหมู่พลอยเลียนแบบเพชรด้วยกัน ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น Syn Kutilite, zircon และ Y.A.G.,G.G.G.,Strontium Titauate มีการใช้คิวบิกเซอร์โคเนียแทนพลอยเลียนแบบเพชรชนิดอื่นๆมา ตั้งแต่ปี 1976 นอกจากนั้นเพชรคิวบิกเซอร์โคเนียยังมีหลายสี เช่น สีใสไม่มีสี, สีส้ม, สีเหลือง, สีชมพู ฯลฯ ทำได้โดยการใช้ธาตุซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดสีต่างๆกัน เติมลงไปในส่วนประกอบทางเคมี เช่น เติมนีโอเดียม (Cerium) จะให้สีส้มถึงแดง เติมโครเมียม (Chromium) จะให้สีเขียว เติมนิกเกิล (Nickel) ให้สีน้ำตาล เติมโคบอลต์ (Cobalt) หรือนีโอไดเนียม (Neodymium) จะให้มีสีม่วงลาเวนเดอร์ เป็นต้น คิวบิกเซอร์โคเนียเป็นพลอยหักเหเดี่ยว มีค่าดัชนีหักเหประมาณ 2.15-2.18 ค่าความถ่วงจำเพาะ 5.40-5.95 ความแข็ง 8-8.5 แยกออกจากเพชรได้โดยดูรอยตำหนิจะพบฟองอากาศ และจะจมเร็วมากในน้ำยา 3.32 ในขณะที่เพชรจะจมช้า ๆ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะต่างกันมาก การผลิตคิวบิกเซอร์โคเนียเพื่อใช้เป็นพลอยเลียนแบบเพชร มีการผลิตขึ้นในประเทศรัสเซีย, สวิตเซอร์แลนด์ และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น ผงเซอร์โคเนีย 1 กิโลกรัม สามารถผลิตเป็นคิวบิกเซอร์โคเนียได้ ประมาณ 500 กรัม (2500 กะรัต) ชื่อทางการค้า ของคิวบิกเซอร์โคเนีย มีอยู่หลายชื่อ เช่น CZ, Cubic Z, Cubic Zirconium, Diamond Z, Diamonair ll, Djevalite, Fianite, Zirconia และ C-OX เป็นต้น ส่วนการเรียกว่าเพชรสวิส หมายถึงเพชรมาจากสวิส เพชรเบลเยียม หมายถึงเพชรที่มาจากเบลเยียม และเพชรรัสเซีย ก็คือเพชรที่เจียรไนมาจากรัสเซียนั่นเอง⁸



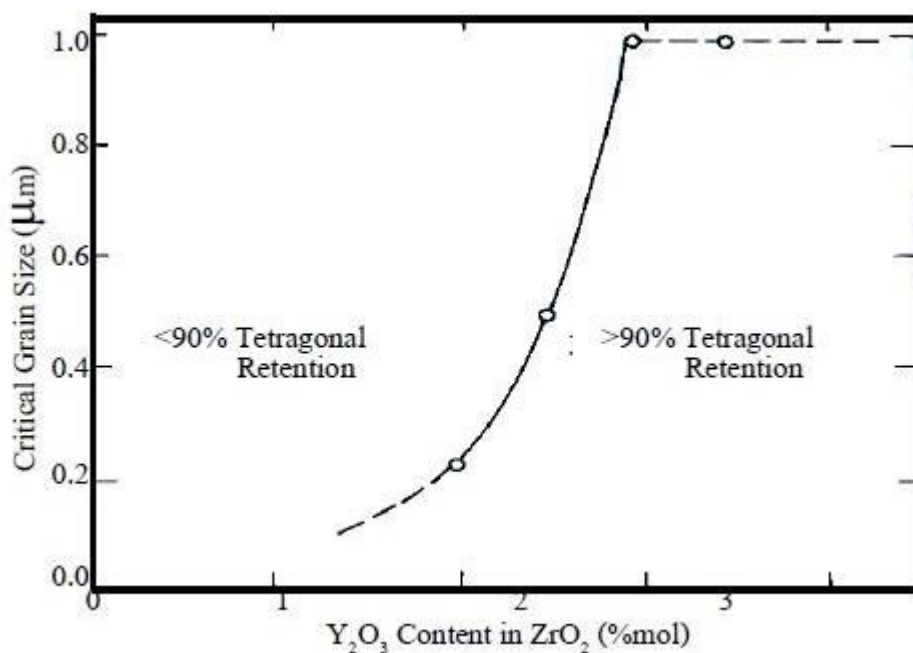
รูปที่ 2.4 รูปร่างคิวบิกเซอร์โคเนียหรือเพชรรัสเซีย⁹

2.1.3.2 Tetragonal Zirconia Polycrystal (TZP)

คือ เซอร์โคเนียที่เสถียรอยู่ในเฟสเตตระโกนอลทั้งหมด โดยทั่วไปจะเกิดจากการใช้อิตเทรียมออกไซด์ เป็นสารสร้างความเสถียร(Stabilizer) หากพิจารณาแผนภูมิเฟสในระบบ ZrO_2 - Y_2O_3 แสดงดังรูปที่ 2.5 บริเวณ 0 mol%-5 mol% ของ Y_2O_3 จะพบว่าในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1300 องศาเซลเซียส ถึง 1650 องศาเซลเซียส เซอร์โคเนียจะอยู่ในเฟสเตตระโกนอลเกือบทั้งหมด ซึ่งหากทำให้เซอร์โคเนียที่อยู่ในสภาพดังกล่าวเย็นตัวอย่างรวดเร็วมาที่อุณหภูมิห้อง จะได้เซอร์โคเนียที่อยู่ในรูปของ TZP¹⁰ ดังรูปที่ 2.5 จากการศึกษาสมบัติระหว่างความแข็งแรงกับขนาดอนุภาคของ TZP พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่เกินกว่าขนาดวิกฤต (Critical Size) โครงสร้างเตตระโกนอลจะสามารถเปลี่ยนเฟสได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งผลของการเปลี่ยนเฟสนี้จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุลดลง ขนาดของเกรนของ TZP มีผลต่อค่าความแข็งแรงดังนั้นจึงมีการศึกษาหาขนาดวิกฤตที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนเฟสของเซอร์โคเนียพบว่า ขนาดวิกฤตขึ้นอยู่กับปริมาณของสารสร้างความเสถียรที่เติมไป ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของ Y_2O_3 - ZrO_2 ¹¹

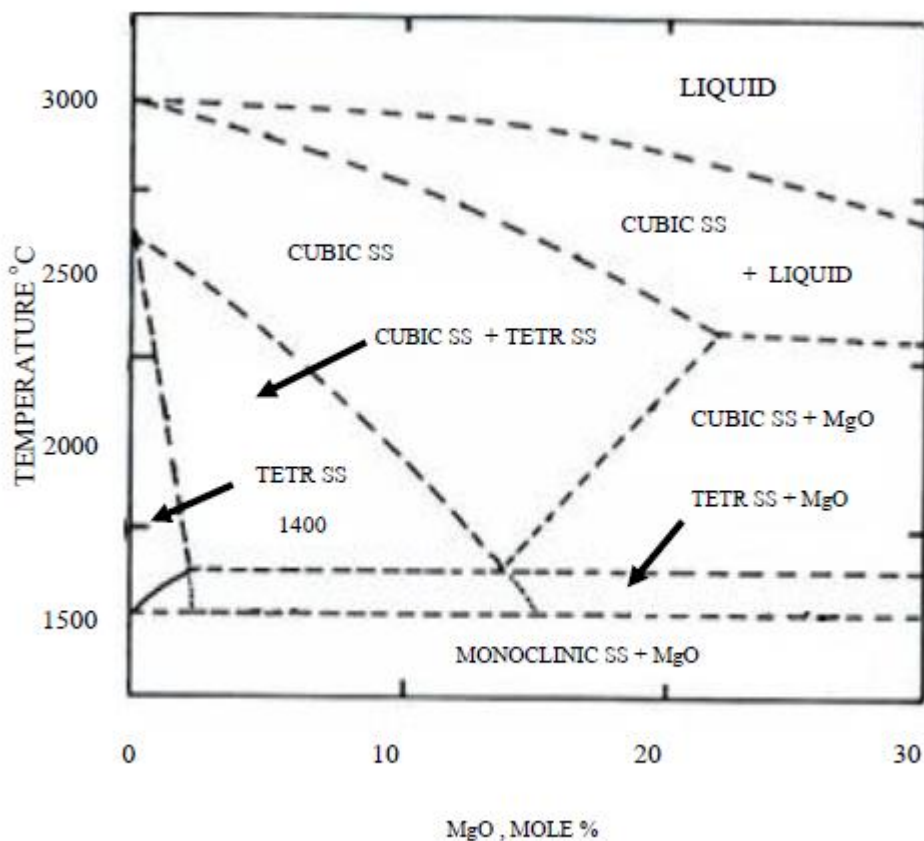


รูปที่ 2.6 ผลของปริมาณสารสร้างความเสถียรกับขนาด Critical Grain Size¹²

2.1.3.3 Partially Stabilised Zirconia (PSZ)

คือ ลักษณะของเซอร์โคเนียที่บางส่วนเสถียร (Stable) ในเฟสเตตระโกนอลแล้วกระจายอยู่ในเฟสคิวบิก โดยทั่วไปการทำให้เกิดโครงสร้างลักษณะนี้จะใช้แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ เป็นสารสร้างความเสถียร โดยหากพิจารณาจากแผนภูมิเฟส ดังรูปที่ 2.7 ในระบบของเซอร์โคเนีย และแมกนีเซียมออกไซด์พบว่าเมื่อเราพิจารณาปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ในช่วง 6-8%mol จะพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 2000 ถึง 2450 องศาเซลเซียส เกิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ในเฟสคิวบิก หากทำให้สารละลายของแข็งนี้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) มาอยู่ในบริเวณที่เกิดสารละลายของแข็งเฟสคิวบิก และเฟสเตตระโกนอล ในบริเวณนี้ก็จะเกิดนิวเคลียสของสารละลายของแข็งเฟสเตตระโกนอล ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของนิวเคลียสได้ โดยการคุมอัตราการลดอุณหภูมิจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมาที่อุณหภูมิต่ำ¹⁰

จากกระบวนการดังกล่าวจะได้ PSZ ซึ่งผลึกของเตตระโกนอลเซอร์โคเนีย (t-ZrO₂) นี้จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็น โมโนคลินิกเซอร์โคเนีย (m-ZrO₂) ได้เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดความต้านทานต่อการแตกร้าว (Toughness) ที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.7 แผนภูมิเฟสของ MgO-ZrO₂¹²

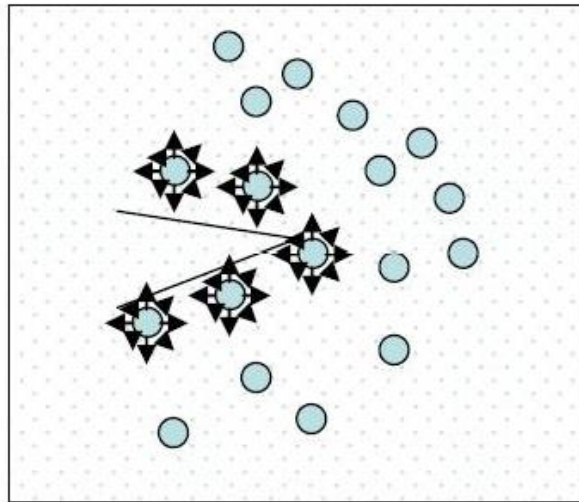
2.1.3.3.1 กระบวนการเกิดความต้านทานต่อการแตกร้าวใน Partially Stabilised Zirconia

คือ การเกิดความต้านทานต่อการแตกร้าวโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงเฟสของเซอร์โคเนียจาก t-ZrO₂ เป็น m-ZrO₂ โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการลดอุณหภูมิหลังจากการเผาผนึก เซอร์โคเนียจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก t-ZrO₂ เป็น m-ZrO₂ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 1200 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม เซอร์โคเนียที่มีขนาดอนุภาคเล็กหรือถูกบังคับโดยเฟสหลัก เช่น เซอร์โคเนียที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของอะลูมินา เซอร์โคเนียเหล่านี้จะสามารถคงตัวอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (Metastable) ของ t-ZrO₂ ได้ กระบวนการการเกิดความต้านทานต่อการแตกร้าวโดยการเปลี่ยนแปลงเฟสนี้จะเริ่มขึ้นเมื่อ มีรอยร้าวเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน รอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลทำให้บริเวณที่มีรอยร้าวเกิดแรงเค้น ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะทำให้เซอร์โคเนียที่อยู่ในสถานะกึ่งเสถียรของ t-ZrO₂ เปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของ m-ZrO₂ โดยผลของการเฟสนี้จะทำให้ เซอร์โคเนียเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยจะขยายตัวประมาณ 3% ส่งผลให้เกิดแรงกดบริเวณปลายของรอยร้าว จึงทำให้รอยร้าวไม่สามารถวิ่งต่อไปได้

ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการเกิดความต้านทานต่อการแตกร้าวนี้คือ ขนาดของอนุภาค เซอร์โคเนีย กล่าวคือ เซอร์โคเนียจะมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงเฟสเนื่องจากแรงเค้นที่เกิดโดย

รอยร้าวขนาดหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะเรียกขนาดนี้ว่าขนาดวิกฤต (Critical Size) ถ้าอนุภาคของเซอร์โคเนียมีขนาดเล็กไปกว่าขนาดวิกฤต เซอร์โคเนียจะไม่ยอมเปลี่ยนเฟสเมื่อมีรอยร้าวขึ้นในชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.8 แต่ถ้าเซอร์โคเนียมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินกว่าขนาดวิกฤต เซอร์โคเนียจะเปลี่ยนเฟสเองโดยธรรมชาติ ซึ่งขนาดวิกฤตนี้จะถูกกำหนดโดยการบังคับของเฟสหลัก และธรรมชาติของเซอร์โคเนียเอง¹⁰

จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า ความต้านทานต่อการแตกร้าวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของ $t\text{-ZrO}_2$ หากชิ้นงานมี $t\text{-ZrO}_2$ มาก ชิ้นงานก็มีแนวโน้มที่จะมีความต้านทานต่อการแตกร้าวเพิ่มขึ้น



○ O₁ Original metastable particle

★ M Martensitically transformed particle

รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดความต้านทานต่อการแตกร้าวโดยอาศัยการเปลี่ยนเฟส¹²

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

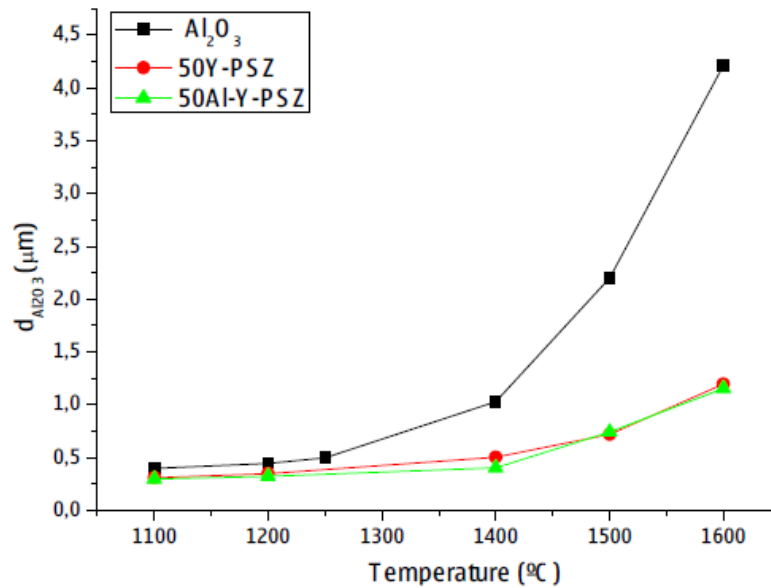
โดยทั่วไปเซรามิกชนิดต่างๆมีความแข็งแรงสูง แต่มีค่าความต้านทานการแตกร้าวที่ต่ำ ซึ่งการเติมเซอร์โคเนียลงในวัสดุเซรามิก จะสามารถปรับปรุงสมบัตินี้ได้ โดยที่ไม่ทำให้คุณภาพของเซรามิกลดลง และยังเพิ่มความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน เช่น ประเภทของวัตถุดิบ กระบวนการ อุณหภูมิการเผาผนึก และกระบวนการทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น¹³

มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาการทำวัสดุอะลูมินา-เซอร์โคเนียคอมโพสิตเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น โดยจากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

2.2.1 การเผาผนึกและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินาและวัสดุอะลูมินา-เซอร์โคเนียคอมโพสิต

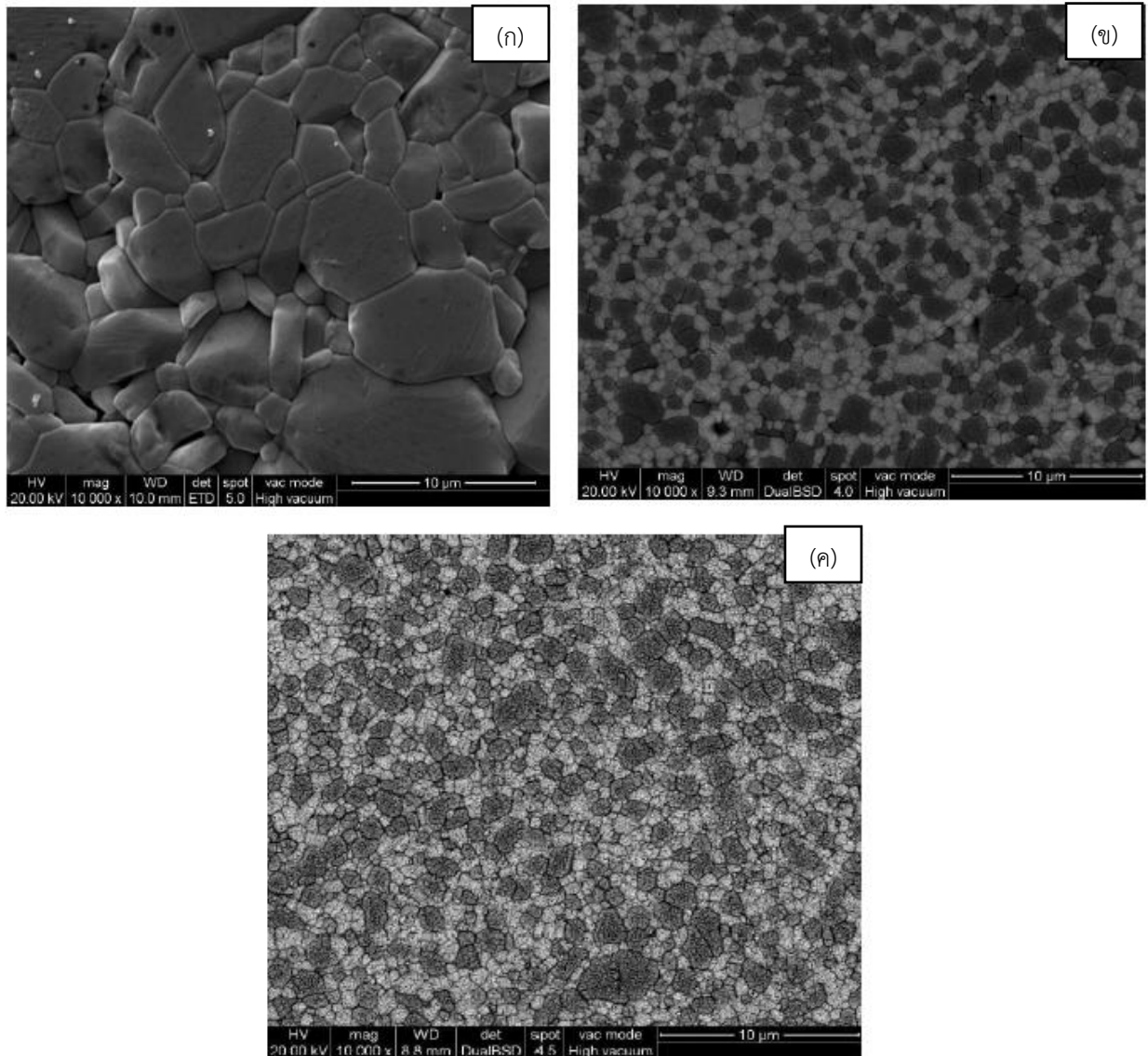
จากการทดลองของ L. Heidy และคณะ¹⁴ ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาควัสดุอะลูมินาและวัสดุอะลูมินา-เซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เตรียมจากผงอะลูมินาและผงเซอร์โคเนีย 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดแรกใช้ผง PSZ ที่ใช้อิตเทรียมออกไซด์ (Y-PSZ) ร้อยละ 3 โดยโมล โดยเป็นสารสร้างความเสถียร และอีกชนิดใช้ผง PSZ ที่ใช้อะลูมินาร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักและอิตเทรียมออกไซด์ (Al-Y-PSZ) เป็นสารสร้างความเสถียรร้อยละ 3 โดยโมล และในการทดลองใช้ปริมาณผงเซอร์โคเนียทั้ง 2 ชนิดมาผสมกับอะลูมินาร้อยละ 50 โดยปริมาตร ได้แก่ 50-Y-PSZ และ 50-Al-Y-PSZ ตามลำดับ ในการทำวัสดุคอมโพสิตโดยการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นงาน

จากผลการทดลองโดยการนำวัสดุอะลูมินา 50-Y-PSZ และ 50-Al-Y-PSZ มาทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 ถึง 1600 องศาเซลเซียส และศึกษาขนาดเกรนเฉลี่ยของวัสดุทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2.9 พบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยของอะลูมินาช่วงอุณหภูมิ 1100 ถึง 1250 องศาเซลเซียส มีขนาดค่อนข้างคงที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 1600 องศาเซลเซียส พบว่ามีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนขนาดเกรนเฉลี่ยของวัสดุคอมโพสิตทั้งสองชนิดค่อนข้างคงที่ ในช่วงอุณหภูมิ 1100 ถึง 1400 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนถึงอุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ส่วนขนาดเกรนเฉลี่ยระหว่างวัสดุคอมโพสิตทั้งสองชนิดมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการคำนวณค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีพบว่าวัสดุคอมโพสิต 50-Y-PSZ และ 50-Al-Y-PSZ มีค่าความหนาแน่นเท่ากับร้อยละ 98.65 และ 98.48 ตามลำดับ



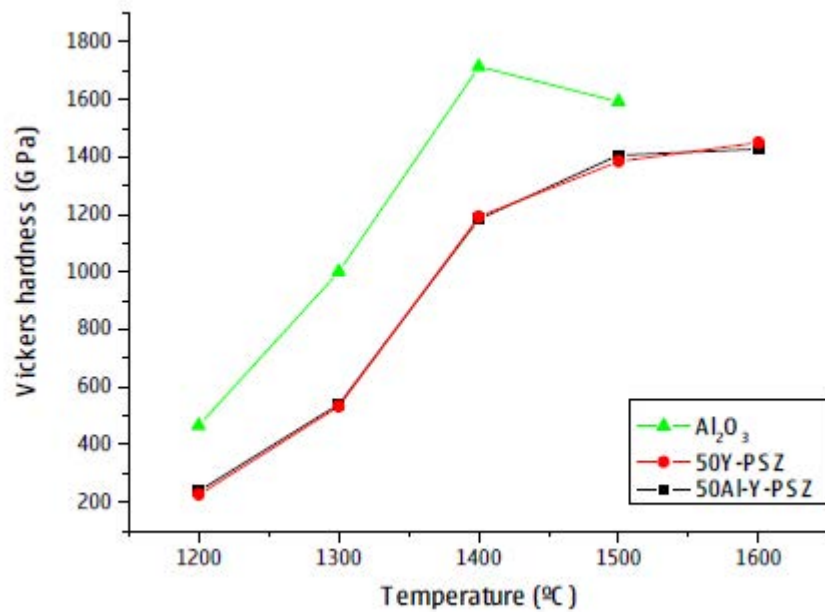
รูปที่ 2.9 ขนาดเกรนเฉลี่ยของอะลูมินาและอะลูมินา-เซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อุณหภูมิการเผาผนึกต่างๆ

จากรูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุทั้ง 3 ชนิด โดยจากรูปลักษณะเกรนของอะลูมินามีสีที่เข้มกว่าเกรนของเซอร์โคเนีย และพบว่าวัสดุคอมโพสิตมีการกระจายตัวที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.10 (ข และ ค) และเมื่อเทียบขนาดเกรนของชิ้นงานทั้งสามชนิดพบว่าขนาดเกรนของวัสดุอะลูมินา ดังรูปที่ 2.10 (ก) มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเกรนของอะลูมินาในวัสดุคอมโพสิต โดยขนาดเกรนของอะลูมินาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่กว่าขนาดเกรนของอะลูมินาในวัสดุคอมโพสิตทั้งสองชนิดถึง 3.5 เท่า ดังนั้นการเติมอนุภาคของเซอร์โคเนียร้อยละ 50 โดยปริมาตร ดังกล่าว สามารถยับยั้งการขยายตัวของเกรน (grain growth) ของอะลูมินาในช่วงอุณหภูมิ 1400 ถึง 1600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่างๆที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส (ก) อะลูมินา (ข) ชั้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนีย 50-Al-Y-PSZ และ (ค) ชั้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนีย 50-Y-PSZ

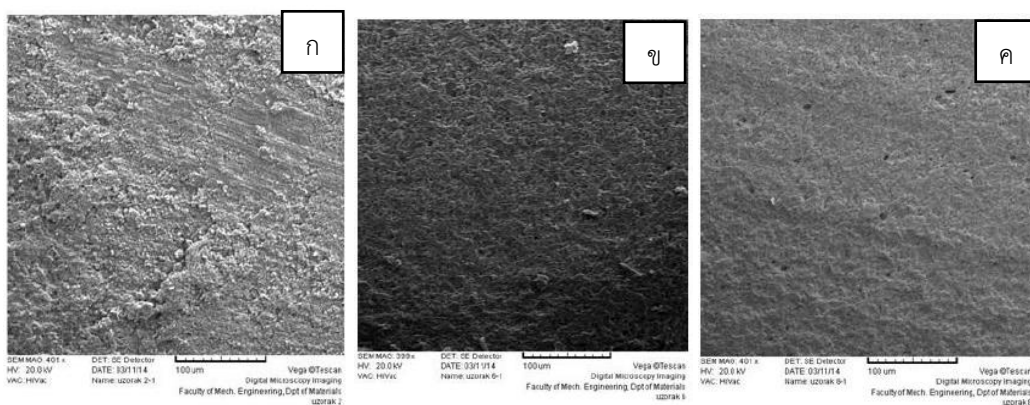
จากการทดสอบค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์พบว่ามีความสอดคล้องกับขนาดเกรนของวัสดุทั้งสามชนิด โดยจากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่า วัสดุอะลูมินาเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 องศาเซลเซียสพบว่ามีความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีความสอดคล้องกับขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน และเมื่อพิจารณาวัสดุคอมโพสิตทั้งสองชนิดพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 1400 ถึง 1500 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาขนาดเกรนพบว่ามีความเล็กกว่า 1 ไมครอน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 1600 องศาเซลเซียสพบว่ามีความแข็งแรงค่อนข้างคงที่



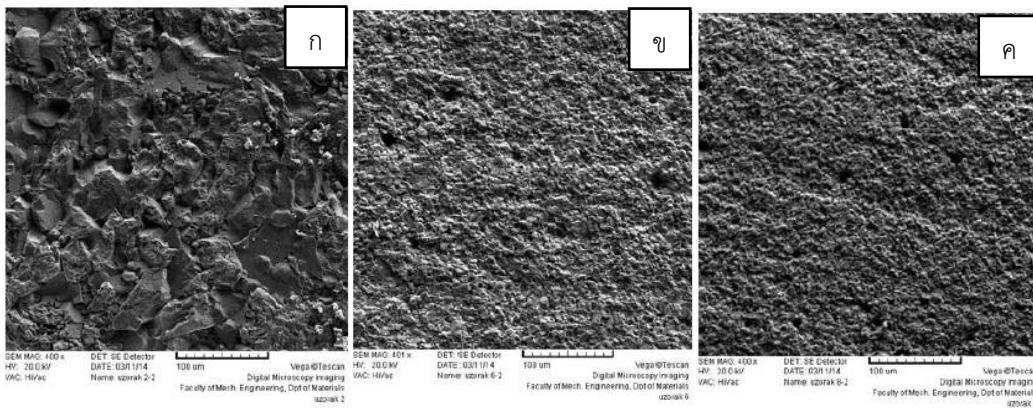
รูปที่ 2.11 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานอะลูมินาและชิ้นงานอะลูมินา-เซอร์โคเนีย

2.2.2 การทนทานต่อการขัดสีของการหล่อวัสดุคอมโพสิตระหว่างอะลูมินากับเซอร์โคเนีย

จากการทดลองของ Marijana, M.R และคณะ¹⁵ ได้ศึกษาความทนทานต่อการขัดสีของชิ้นงานอะลูมินา และวัสดุอะลูมินา-เซอร์โคเนียคอมโพสิต ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-t-ZrO}_2$) โดยเติม t-ZrO₂ ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทดสอบโดยการขัดสีด้วยการพ่นทรายซิลิกา และได้ทำการศึกษาที่มุมตกกระทบต่อการขัดสีเท่ากับ 30, 60 และ 90 องศา โดยเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่างก่อนและหลังการขัดสีที่มุมตกกระทบดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าผงทรายที่ขัดสีที่มุมตกกระทบ 30 องศา มีผลต่อพื้นผิวอย่างมาก



รูปที่ 2.12 ภาพ SEM ของตัวอย่างก่อนทดสอบการขัดสี (ก) monolithic Al_2O_3 (ข) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-t-ZrO}_2$ คอมโพสิต ประกอบด้วย t-ZrO₂ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (ค) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-t-ZrO}_2$ คอมโพสิต ประกอบด้วย t-ZrO₂ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.13 ภาพ SEM ของตัวอย่างหลังทดสอบการขัดสีที่มุมตกกระทบ 30 องศา
(ก) monolithic Al_2O_3 (ข) Al_2O_3 -t- ZrO_2 คอมโพสิต ประกอบด้วย t- ZrO_2 ร้อยละ 5
โดยน้ำหนัก และ (ค) Al_2O_3 -t- ZrO_2 คอมโพสิต ประกอบด้วย t- ZrO_2 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุอะลูมินาเซรามิกให้สามารถทนทานต่อการขัดสีได้โดยการเติม t- ZrO_2 ในปริมาณมากขึ้น และเมื่อเพิ่มขนาดมุมตกกระทบของการขัดสีพบว่าชิ้นงานทนทานต่อการขัดสีได้มากขึ้น

2.2.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างอะลูมินา-เซอร์โคเนียโดยใช้ผงวัตถุดิบราคาถูก

จากการทดลองของ กันทิมา เหมราช¹⁶ ได้ศึกษาถึงกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างอะลูมินา-เซอร์โคเนีย โดยใช้ผงวัตถุดิบราคาถูก และกระบวนการผลิตแบบง่าย ในการวิจัยได้เลือกใช้ผงอะลูมินา A-21 และผงเซอร์โคเนีย GTYS-5 จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการบดเพื่อลดขนาดในแอทริชันมิลล์ และนำผงที่ได้มาผสมในอัตราส่วน A-21/GTYS-5 เป็น 0/100, 20/80, 40/60, 60/40 และ 80/20 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นชิ้นทดลองโดยการอัด และทำการเผาผนึกในช่วง 1350-1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากผ่านกระบวนการบดเพื่อลดขนาดแล้ว A-21 และ GTYS-5 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 0.73 และ 0.57 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น และสามารถซินเทอร์ให้มีความหนาแน่นประมาณร้อยละ 96 ถึง 98 ของค่าทางทฤษฎี เกรนของเซอร์โคเนียมีผลไปยังการเติบโตของเกรนของอะลูมินาโดยปรากฏที่ขอบเกรนของอะลูมินา เป็นผลให้วัสดุเชิงประกอบมีขนาดเกรนลดลงเมื่อปริมาณ GTYS-5 เพิ่มขึ้น ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ A-21 เพิ่มขึ้น ความแกร่งของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงสุด 6.0 เมกะพาสคัล.เมตร^{1/2} เมื่อมีปริมาณ GTYS-5 เป็นร้อยละ 20 และ 80 โดยน้ำหนัก ชิ้นตัวอย่างที่มี GTYS-5 เป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนักมีค่าความทนต่อแรงดัดถึง 632 เมกะพาสคัล

เมื่อปริมาณ GTYS-5 ที่สูง กลไกหลักในการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบเกิดจากการเปลี่ยนเฟสจากเตตระโกนอลเป็นโมนอกลิติก เป็นผลให้วัสดุแตกแบบผ่านเกรน

งานวิจัยก่อนหน้านี้เป็นการทดลองทำวัสดุคอมโพสิตระหว่างอะลูมินา-เซอร์โคเนีย เพื่อนำมาพัฒนาคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งเซอร์โคเนียที่นำมาทำการทดลองมีทั้งที่อยู่ในเฟสโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลและโมนอกลิติก ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวได้แสดงว่าเกรนของเซอร์โคเนียเป็นตัวยับยั้งการโตของอะลูมินาทำให้เกรนมีขนาดลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง ค่าความต้านทานการแตกร้าวเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการนำวัสดุเชิงประกอบระหว่างอะลูมินา-เซอร์โคเนีย เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลเช่นกัน แต่เซอร์โคเนียที่นำมาทำการทดลองอยู่ในเฟสโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก ซึ่งวัสดุตัวนี้เป็นผลพลอยได้จากการอุตสาหกรรมเจียระไนเพชรคิวบิกเซอร์โคเนีย โดยคิวบิกเซอร์โคเนียมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่สูงกว่าอะลูมินา เมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัวและหดตัวสูงเมื่อเย็นตัวลง โดยจะหดตัวมากกว่าอะลูมินา ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างคิวบิกเซอร์โคเนียและอะลูมินาขึ้น ซึ่งช่องว่างดังกล่าวนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยร้าว รอบๆเกรนของเซอร์โคเนีย (Pre-crack) โดยกระบวนการเกิดความต้านทานการแตกร้าวจะเริ่มเมื่อมีรอยร้าว (crack) ขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งรอยร้าวจะวิ่งต่อไปจนไปเจอกับ Pre-crack ที่เตรียมไว้ และจะเกิดการกระจายความเค้น (stress) ออก ทำให้รอยร้าวไม่สามารถวิ่งต่อไปได้อีก ซึ่งกลไกนี้จะทำให้เกิดความต้านทานการแตกร้าวขึ้นในวัสดุคอมโพสิตในงานวิจัยนี้ ทำให้วัสดุให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 ผงอะลูมินา

ในการทดลองใช้ผงอะลูมินา 3 ขนาด ได้แก่ P172SB (ขนาด 0.4 ไมครอน), P122SB (2.5 ไมครอน) และ AC34B4 (ขนาด 4 ไมครอน) จากบริษัท Alteo ที่มีปริมาณอะลูมินาร้อยละ 99.7 โดยน้ำหนัก สิ่งเจือปนหลัก ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซิลิกา (SiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมินาแสดงดังตารางที่ 3.1

3.1.2 ผงคิวบิกเซอร์โคเนีย

ในการทดลองใช้ผงเซอร์โคเนีย จากบริษัท อิตาเลียนไทยเซรามิกวัสดุทนไฟ จำกัด ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการเจียระไนเพชรคิวบิกเซอร์โคเนีย องค์ประกอบหลักประกอบด้วยเซอร์โคเนียร้อยละ 61.23 โดยน้ำหนัก อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ร้อยละ 28.69 โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ร้อยละ 5.14 โดยน้ำหนัก แฮฟเรียมออกไซด์ (HfO_2) ร้อยละ 2.64 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 1.17 โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ ร้อยละ 0.37 โดยน้ำหนัก และมลทินอื่นๆร้อยละ 0.18 โดยน้ำหนัก ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของผงคิวบิกเซอร์โคเนียแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น

องค์ประกอบเคมี	อะลูมินา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*			คิวบิกเซอร์โคเนีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)**
	P172SB	AR12	AC34B4	
Al_2O_3	99.7	99.7	99.7	0.47
ZrO_2	-	-	-	61.23
Na_2O	0.1	0.25	0.25	0.11
Y_2O_3		-	-	28.69
CaO	0.02	0.01	0.01	1.17
MoO_3		-	-	5.14
SiO_2	0.1	0.01	0.01	-
HfO_2		-	-	2.64
Fe_2O_3	0.02	0.01	0.01	0.11

หมายเหตุ: * ข้อมูลจากบริษัท Alteo

** ข้อมูลจากบริษัท อิตาเลียนไทยเซรามิกวัสดุทนไฟ จำกัด

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

1) นำผงอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียมาอบที่ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำผงอะลูมินามาผ่านตะแกรงเบอร์ 40 คิวบิกเซอร์โคเนียผ่านตะแกรงเบอร์ 150

2) นำคิวบิกเซอร์โคเนียผสมลงไปผงอะลูมินา ในอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนียร้อยละ 100:0, 90:10, 80:10 และ 70:30 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนีย

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่างอะลูมินาและ คิวบิกเซอร์โคเนีย	อะลูมินา	คิวบิกเซอร์โคเนีย
100:0	100	0
90:10	90	10
80:20	80	20
70:30	70	30
0:100	0	100

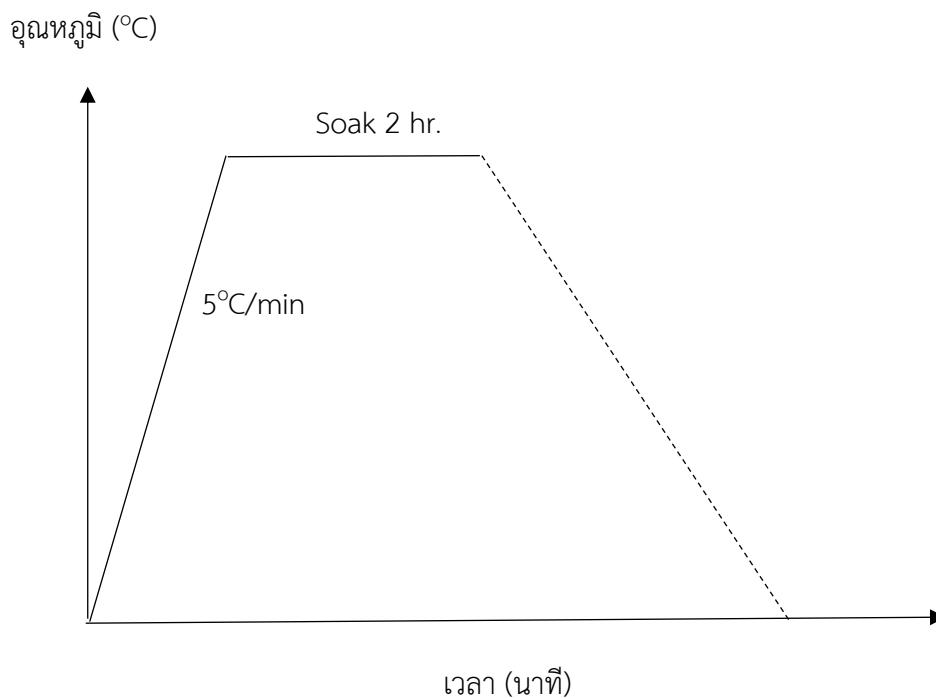
3) นำอัตราส่วนจากข้อ 2 มาบดผสมแบบเปียกด้วย Ball mill โดยใช้ลูกบดอะลูมินาหนัก 548 กรัม และใช้เอทานอล 126 กรัม เป็นตัวกลาง (Medium) บดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4) นำผงตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3. มาทำการผสม PVA ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยนำผง PVA น้ำหนัก 10 กรัม มาละลายด้วยน้ำปริมาตร 90 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

5) นำผงตัวอย่างจากข้อ 4. มาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบทิศทางเดียว (Uniaxial pressing, บริษัท NPa system) ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้แรงอัด 25 เมกะพาสคัล แม่พิมพ์อัดขนาดผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร โดยปริมาณ 6 กรัม จากนั้นนำไปอบ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.2 การเผาผืนิก

นำตัวอย่างที่เตรียมผ่านการอัดขึ้นรูปมาเผาผืนิกด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง รุ่น LHT16/R17 บริษัท Nabertherm เพื่อให้ชิ้นงานสุกตัวและเพิ่มความหนาแน่นให้กับชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 1450, 1500, 1550, 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กราฟแสดงสภาวะการเผาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงสภาวะการเผาผืนิกชิ้นงานตัวอย่าง

3.2.3 การทดสอบความหนาแน่น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวของชิ้นงาน

การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างหลังเผาผืนิก ทดสอบด้วยวิธี Archimedes's method โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) นำชิ้นงานที่ผ่านเผาผืนิกไปต้มในน้ำเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยการต้มน้ำต้องให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลา จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) นำตัวอย่างในข้อที่ 1 ไปทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ (W_{SS})

3) นำตัวอย่างที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอิมมัวในน้ำ (W_S) โดยใช้ผ้าชุบน้ำ ปิดให้หมด แล้วเช็ดน้ำส่วนเกินที่ผิวออกแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบให้แห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง (W_D) จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ (3.1-3.3) คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ ดังสมการที่ (3.4) คำนวณการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ (3.5) และคำนวณความพรุนตัว ดังสมการที่ (3.6)

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (V)} = \frac{W_s - W_{ss}}{\rho} \quad (3.1)$$

ρ คือความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ 1 g/cm^3

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง (Bulk Density)} = \frac{W_D}{W_s - W_{ss}} \quad (3.2)$$

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง (Theoretical Density)} = \frac{W_{\text{Total}}}{W_a / \rho_a + W_b / \rho_b} \quad (3.3)$$

$$\text{ความหนาแน่นสัมพัทธ์} = \frac{\text{Bulk Density}}{\text{Theoretical Density}} \quad (3.4)$$

$$\text{การดูดซึมน้ำ} = \frac{W_s - W_D}{W_D} \times 100 \quad (3.5)$$

$$\text{ความพรุนตัว} = \frac{W_s - W_D}{W_D - W_{ss}} \times 100 \quad (3.6)$$

โดย W_{total} = น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง

$W_{\text{Al}_2\text{O}_3}, W_{\text{ZrO}_2}$ = น้ำหนักของอะลูมินาและ คิวบิกเซอร์โคเนีย

$\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}, \rho_{\text{ZrO}_2}$ = ความหนาแน่นทางทฤษฎีของอะลูมินาและ

เซอร์โคเนียซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.97 และ 6.045 g/cm^3 ตามลำดับ

3.2.4 การทดสอบการหดตัวหลังเผา

การทดสอบการหดตัวหลังเผา ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูป (L_p) ที่ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm . แล้วนำชิ้นงานไปอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานไปเผาผืนึก

2) นำชิ้นงานผ่านการเผาผืนึกมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (L_f) จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าการหดตัวหลังเผา ดังสมการที่ (3.7)

3) การคำนวณหาการหดตัวหลังเผาของตัวอย่าง

$$\text{การหดตัวหลังเผา} = \frac{L_p - L_f}{L_p} \times 100 \quad (3.7)$$

3.2.5 การทดสอบความต้านแรงดัด

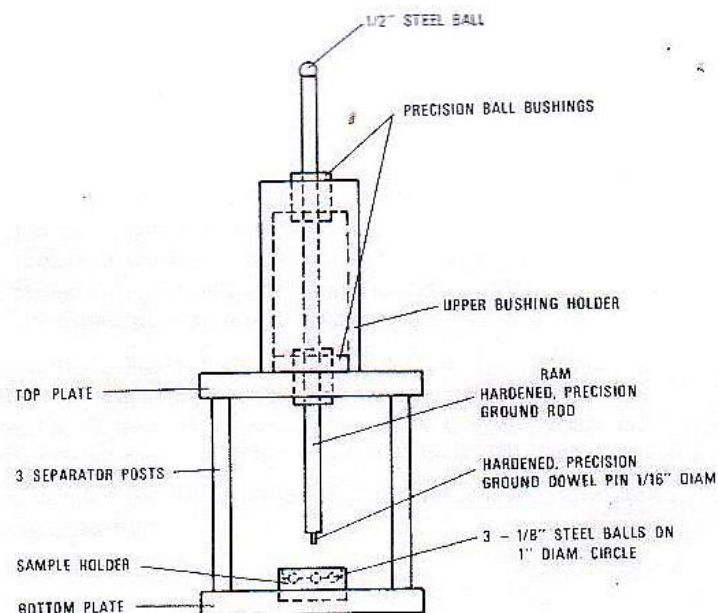
ทดสอบความต้านทานแรงดัดด้วยเทคนิค Biaxial flexure strength โดยเครื่อง Instron Testing Machine รุ่น 5843 ลักษณะอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 สามารถคำนวณความต้านทานแรงดัดคำนวณได้จากสมการที่ (3.8-3.10)

$$S = \frac{-0.2387P(X-Y)}{d^2} \text{ MPa} \quad (3.8)$$

$$X = (1+n) \ln(B/C)^2 + [1-n/2](B/C)^2 \quad (3.9)$$

$$Y = (1+n) [1+\ln(A/C)^2] + (1-n)(A/C)^2 \quad (3.10)$$

- โดย S = ความทนแรงดึงสูงสุดที่จุดศูนย์กลาง หน่วยเป็น MPa
 P = ขนาดของแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก หน่วยเป็น kg.
 m = อัตราส่วน Poisson เท่ากับ 0.23
 A = รัศมีของ support circle หน่วยเป็น mm.
 B = รัศมีของ loaded area หน่วยเป็น mm.
 C = รัศมีของชิ้นงานตัวอย่าง หน่วยเป็น mm.
 d = ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง หน่วยเป็น mm.



รูปที่ 3.2 ลักษณะการทดสอบความต้านทานแรงดัดด้วยเทคนิค Biaxial-flexure strength-test flexure ตามมาตรฐาน ASTM F 394-78.

ในการทดลอง :

$$A = 12.5 \text{ mm.}$$

$$B = 0.25 \text{ mm. วัดจากพื้นที่สัมผัสจากกล้องจุลทรรศน์}$$

3.2.6 การทดสอบความแข็ง

ทดสอบความแข็งของชิ้นงานด้วยเทคนิค Vicker indentation (model HV-50A) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.11)

$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (3.11)$$

โดย HV = ค่าความแข็งที่ได้จาก Vickers indenter

P = น้ำหนักที่ห้ำกด (kg. force)

\bar{d} = ค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm.)

3.2.7 การทดสอบความต้านทานการแตกร้าว

การหาค่าความต้านทานการแตกร้าวโดยใช้เทคนิคอินเดนเทชัน (Indentation) ซึ่งคำนวณได้จากการสมการที่ (3.12)

$$K_{IC} = 0.0726 \left(\frac{P}{C^{3/2}} \right) \quad (3.12)$$

โดย K_{IC} = ค่าความต้านทานการแตกร้าว มีหน่วยเป็น $\text{MPa.m}^{1/2}$

P = ขนาดแรงกดอินเดนเทชัน มีหน่วยเป็น N

C = ความยาวรอยแตก มีหน่วยเป็น mm.

3.2.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงาน

-การขัดผิวชิ้นงาน

1) ขัดชิ้นงานอะลูมินา-ควิวิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เตรียมได้ในทุกอัตราส่วน ด้วยแผ่นขัดเพชร (diamond grinding disc) ที่มีความหยาบเรียงจาก 250 125 และ 75 ไมครอน ตามลำดับ ด้วยทิศทางตั้งฉากกัน จนกระทั่งระนาบผิวใกล้เคียงกันที่สุด

2) ขัดชิ้นงานต่อด้วยกระดาษทราย (SiC paper) ที่มีความหยาบเรียงจาก 35 16 และ 10 ไมครอน ตามลำดับ ด้วยทิศทางตั้งฉากกัน เพื่อให้ชิ้นงานที่ขัดได้มีระนาบที่ละเอียดและสม่ำเสมอมากขึ้นจนเริ่มเกิดความเงา และสะท้อนแสงเล็กน้อยบนพื้นผิวชิ้นงาน

3) ใช้ผงเพชร (polycrystalline diamond) ขัดชิ้นงานเพื่อขจัดผิวที่เสียหายจากขั้นตอนก่อน ทำให้ชิ้นงานเกิดความเงามัน และได้ระนาบที่ดีขึ้น โดยมีความหยาบ 3 และ 1 ไมครอนตามลำดับ โดยทำการขัดด้วยทิศตั้งฉากกัน

- การกัดผิวชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวแล้ว มาทำการกัดด้วยความร้อน (thermal etching) ด้วยการนำไปเผาโดยอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเผาผนึก 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ลักษณะโครงสร้างปรากฏชัดขึ้น

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM บริษัท JEOL รุ่น JSM-6480LV)

การหาขนาดเกรนเฉลี่ย

การหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย สามารถทำได้ด้วยวิธี Lineal intercept โดยใช้ภาพการกระจายตัวของเกรนจาก SEM ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

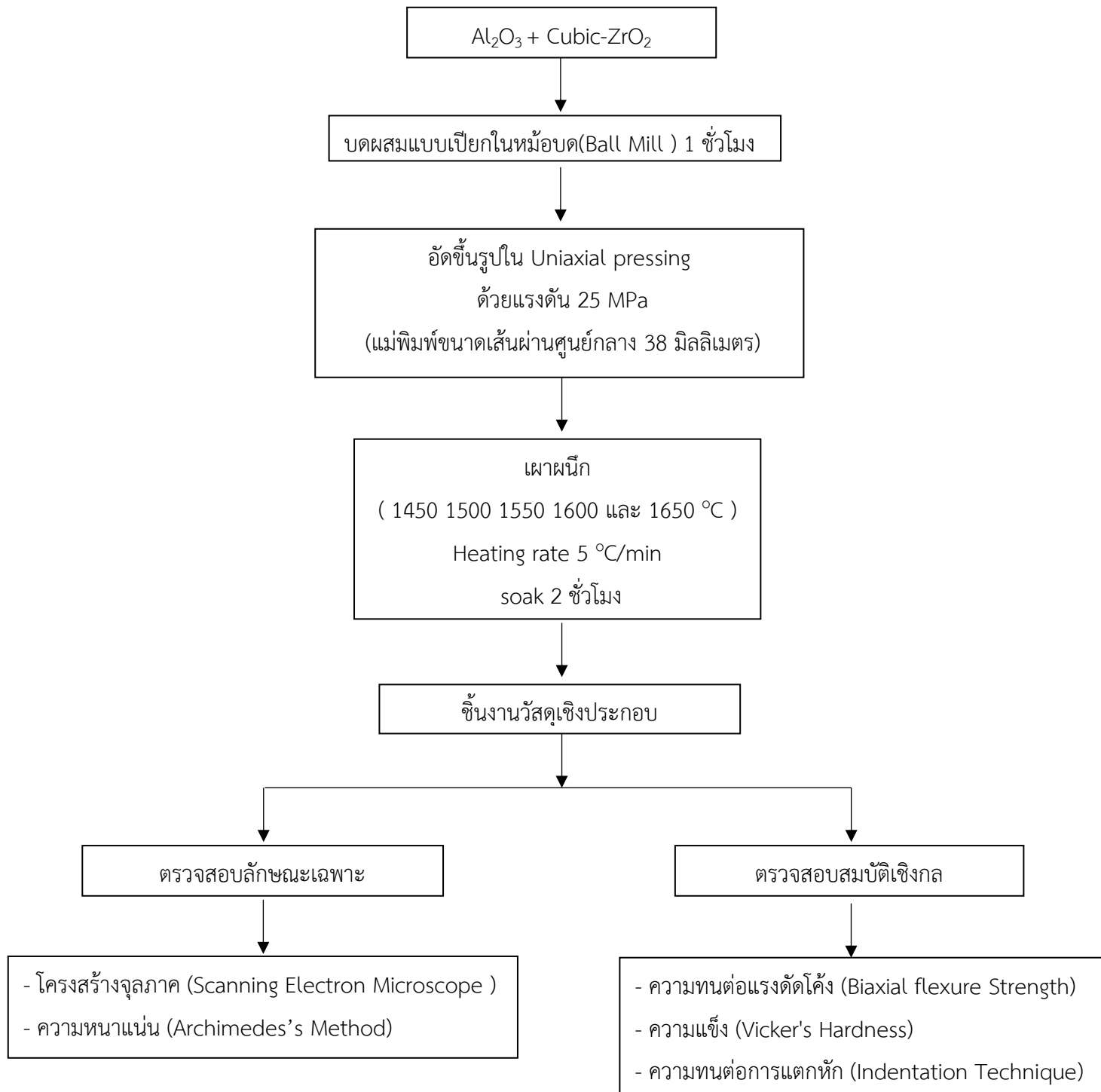
$$D = 1.571 \frac{C}{N} \quad (3.9)$$

โดย D = ขนาดเกรนเฉลี่ย มีหน่วยเป็น μm

C = ความยาวของเส้นตรงที่ลากผ่านขอบเกรนที่ต้องการวัด มีหน่วยเป็น μm

N = จำนวนขอบเกรนที่เส้นตรงลากผ่าน

จากวิธีการดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปเป็นแผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลองได้ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของขนาดผงอะลูมินาต่อการเผาผนึก

ในเบื้องต้นได้ทำการทดสอบผลของขนาดผงอะลูมินาต่อการเผาผนึกเพื่อเลือกขนาดผงอะลูมินาที่จะนำไปเตรียมเป็นวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตต่อไป โดยนำชิ้นงานที่เตรียมจากผงอะลูมินาขนาด 0.4, 2.5 และ 4 ไมครอน ไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมบัติชิ้นงานอะลูมินาที่เตรียมจากผงอะลูมินาขนาดอนุภาค 0.4, 2.5 และ 4 ไมครอน แสดงดังตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผงอะลูมินาขนาด 0.4 ไมครอน มีสมบัติที่ดีที่สุด โดยมีสมบัติดังนี้ มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3.92 ± 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 98.65 ± 0.66 ความพรุนตัวร้อยละ 1.22 ± 0.54 และการหดตัวหลังเผาเท่ากับร้อยละ 18.92 ± 0.43 ซึ่งเป็นสมบัติที่มีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอะลูมินาขนาดอนุภาค 2.5 และ 4 ไมครอน ส่วนการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.31 ± 0.14 ซึ่งเป็นสมบัติที่มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอะลูมินาขนาดอนุภาค 2.5 และ 4 ไมครอน เนื่องจากผงอะลูมินาขนาด 0.4 ไมครอน เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า จึงมีความสามารถในการเผาผนึกที่ดีกว่า ดังนั้นจึงได้เลือกผงอะลูมินาที่มีขนาดเท่ากับ 0.4 ไมครอน มาใช้ในการเตรียมวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตในขั้นตอนต่อไป

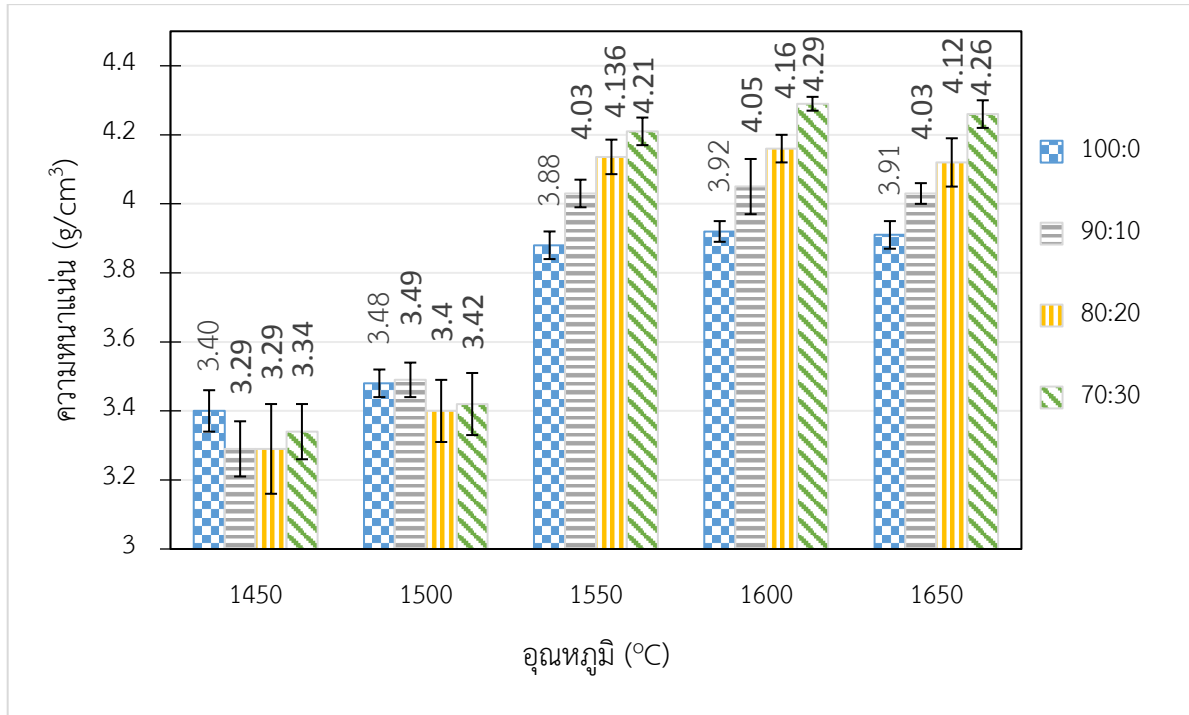
ตารางที่ 4.1 สมบัติของชิ้นงานอะลูมินาหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความพรุนตัว (ร้อยละ)	การหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)
0.4	3.92 ± 0.03	98.65 ± 0.66	0.31 ± 0.14	1.22 ± 0.54	18.92 ± 0.43
2.5	2.80 ± 0.04	68.00 ± 1.01	10.77 ± 0.48	30.10 ± 0.93	7.56 ± 0.21
4	2.58 ± 0.03	62.82 ± 0.81	13.61 ± 0.49	35.13 ± 0.82	5.55 ± 0.13

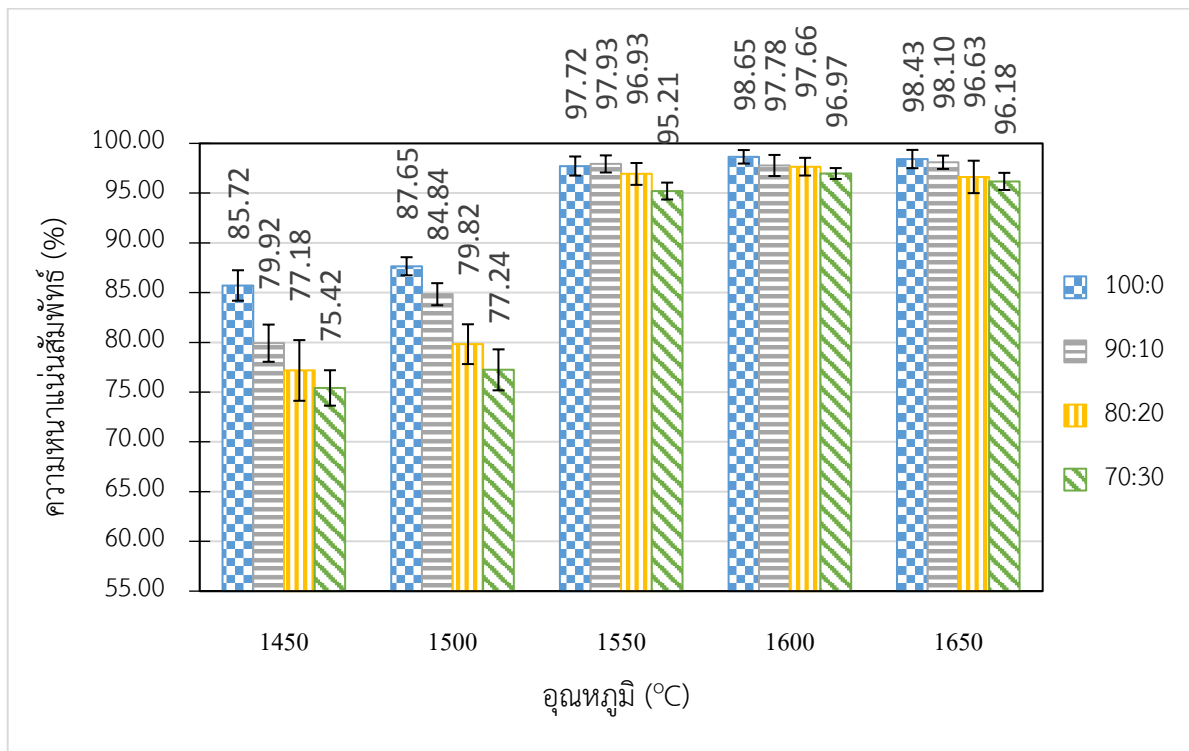
4.2 สมบัติของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อนำควิบิคเซอร์โคเนียมาผสมกับผงอะลูมินาขนาด 0.4 ไมครอน โดยมีอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาต่อควิบิคเซอร์โคเนีย ได้แก่ 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 ภายใต้อุณหภูมิการเผาผืนึกเท่ากับ 1450 1500 1550 1600 และ 1650 ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยสมบัติของชิ้นงานคอมโพสิตที่เตรียมได้ แสดงดังรูปที่ 4.1-4.5

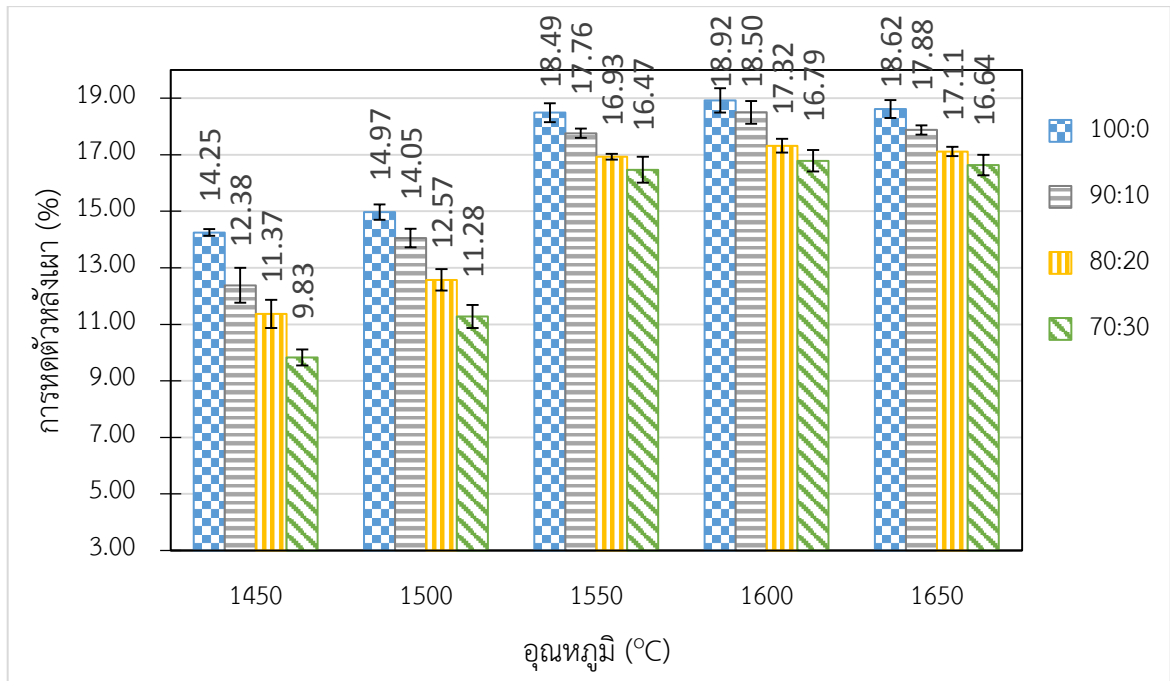
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผืนึกจาก 1450 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 1600 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสมบัติของวัสดุอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิต ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ การหดตัวหลังเผา และความต้านแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึงที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส พบว่าสมบัติดังกล่าวมีค่าลดลง ส่วนค่าการดูดซึมน้ำเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผืนึกจาก 1450 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 1600 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึงที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส พบว่าสมบัติดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาผืนึกคือช่วง 1600 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมควิบิคเซอร์โคเนียลงในอะลูมินาในปริมาณเพิ่มขึ้น ได้แก่ ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยในช่วงอุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสพบว่ามีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 3.92 ± 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 4.29 ± 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากความหนาแน่นของควิบิคเซอร์โคเนียมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของอะลูมินา อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ลดลงจากร้อยละ 98.65 เป็นร้อยละ 96.97 ± 0.55 ค่าการดูดซึมน้ำลดลงจากร้อยละ 0.31 ± 0.14 เป็นร้อยละ 0.26 ± 0.09 ค่าการหดตัวหลังเผามีค่าลดลงจากร้อยละ 18.92 ± 0.43 เป็นร้อยละ 16.79 ± 0.38 และค่าความต้านแรงดัดลดลงจาก 469.97 ± 38.31 เมกะพาสคัล เป็น 343.12 ± 34.40 เมกะพาสคัล จากสมบัติดังกล่าวของชิ้นงานที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าการเติมควิบิคเซอร์โคเนียเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการเผาผืนึกลดลง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง



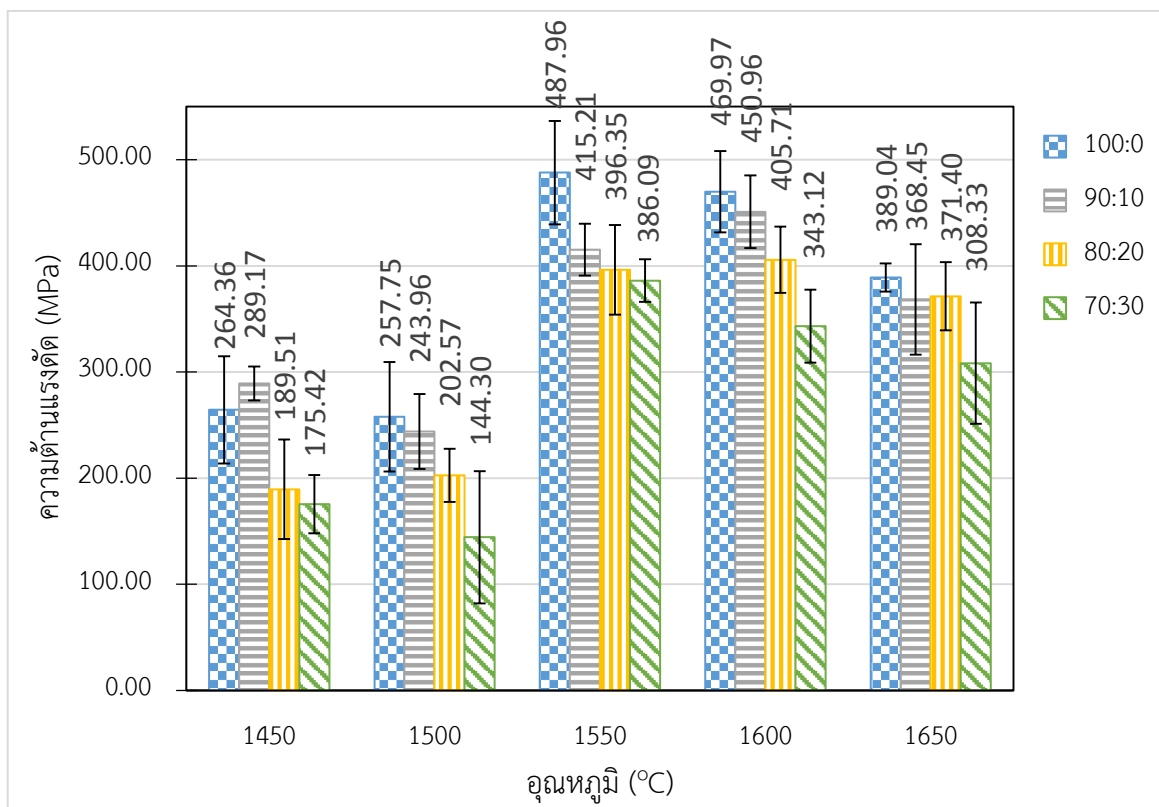
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานอะลูมินา-โครเมียมออกไซด์คอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



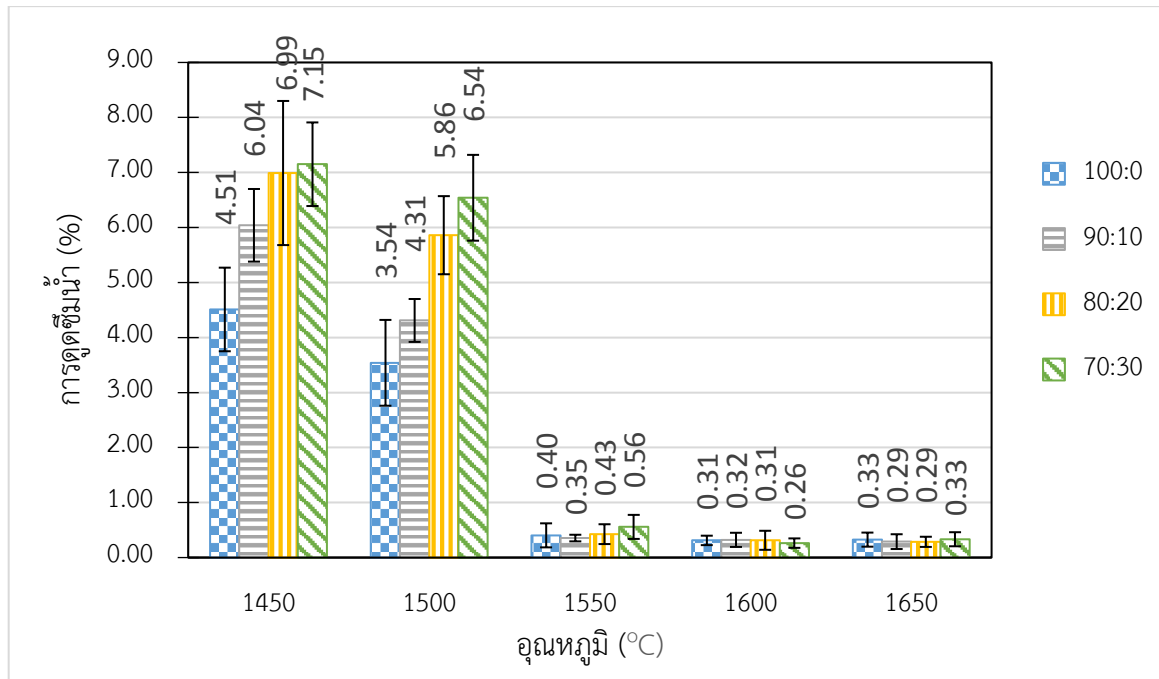
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานอะลูมินา-โครเมียมออกไซด์คอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานอะลูมินา-คัลเซียมโบรเอตคอมโพสิตหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.3 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติของคัลเซียมโบรเอต

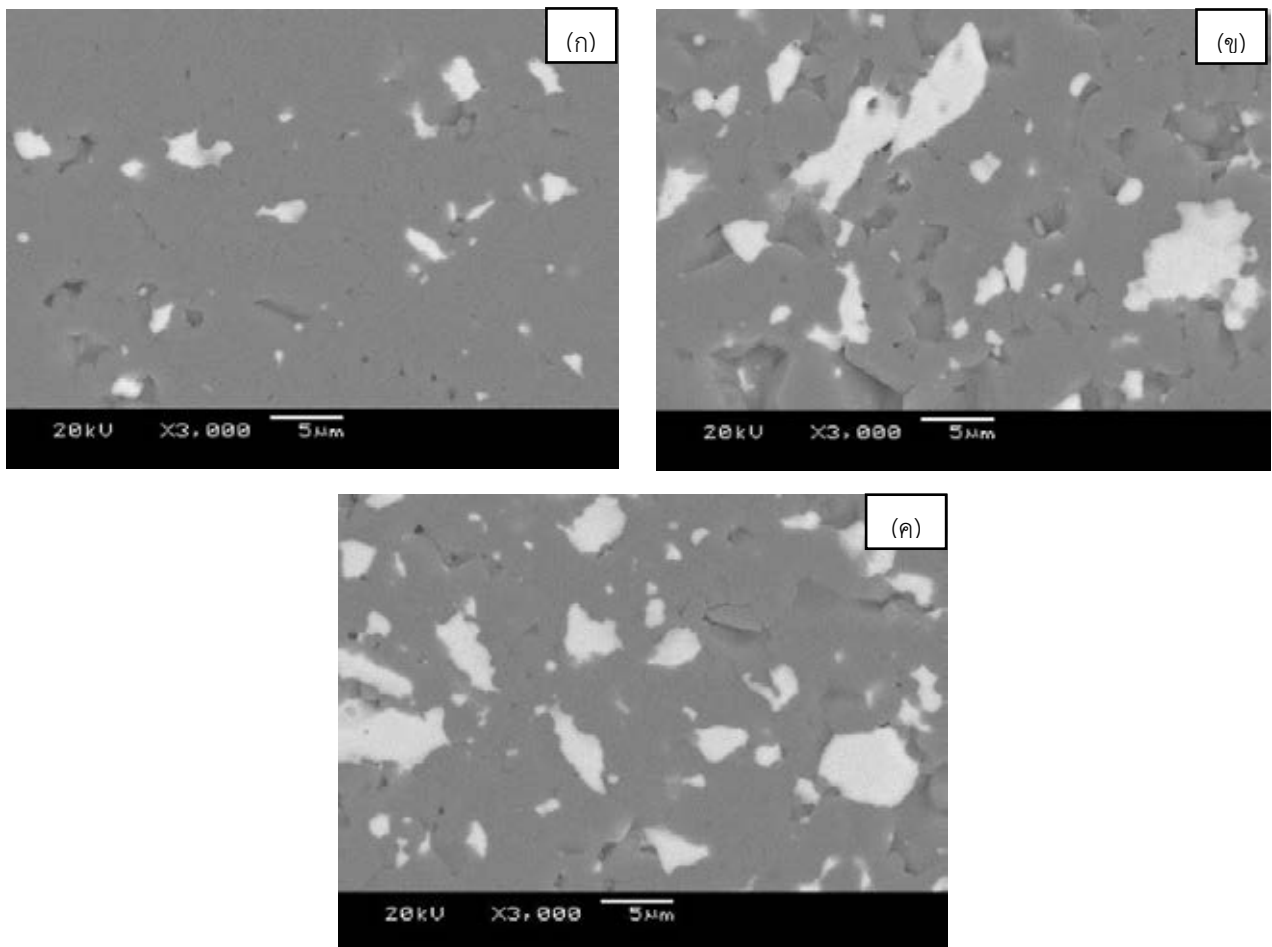
การทดสอบผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติของคัลเซียมโบรเอตเพื่อพิจารณาความสามารถในการเผาผนึกของคัลเซียมโบรเอต ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-คัลเซียมโบรเอตคอมโพสิต โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 เมื่อนำคัลเซียมโบรเอตมาเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1450 องศาเซลเซียสไปจนถึง 1650 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 61.14 ± 0.77 เป็นร้อยละ 72.92 ± 1.28 และมีค่าการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.02 ± 0.11 เป็นร้อยละ 9.01 ± 0.32 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำลดลงจากร้อยละ 10.18 ± 0.35 เป็นร้อยละ 5.64 ± 0.47 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติดังกล่าวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการเติมคัลเซียมโบรเอตลงในอะลูมินาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการเผาผนึกลดลง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง

ตารางที่ 4.2 สมบัติของชิ้นงานคิวบิกเซอร์โคเนียหลังผ่านการเผาผนึกอุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

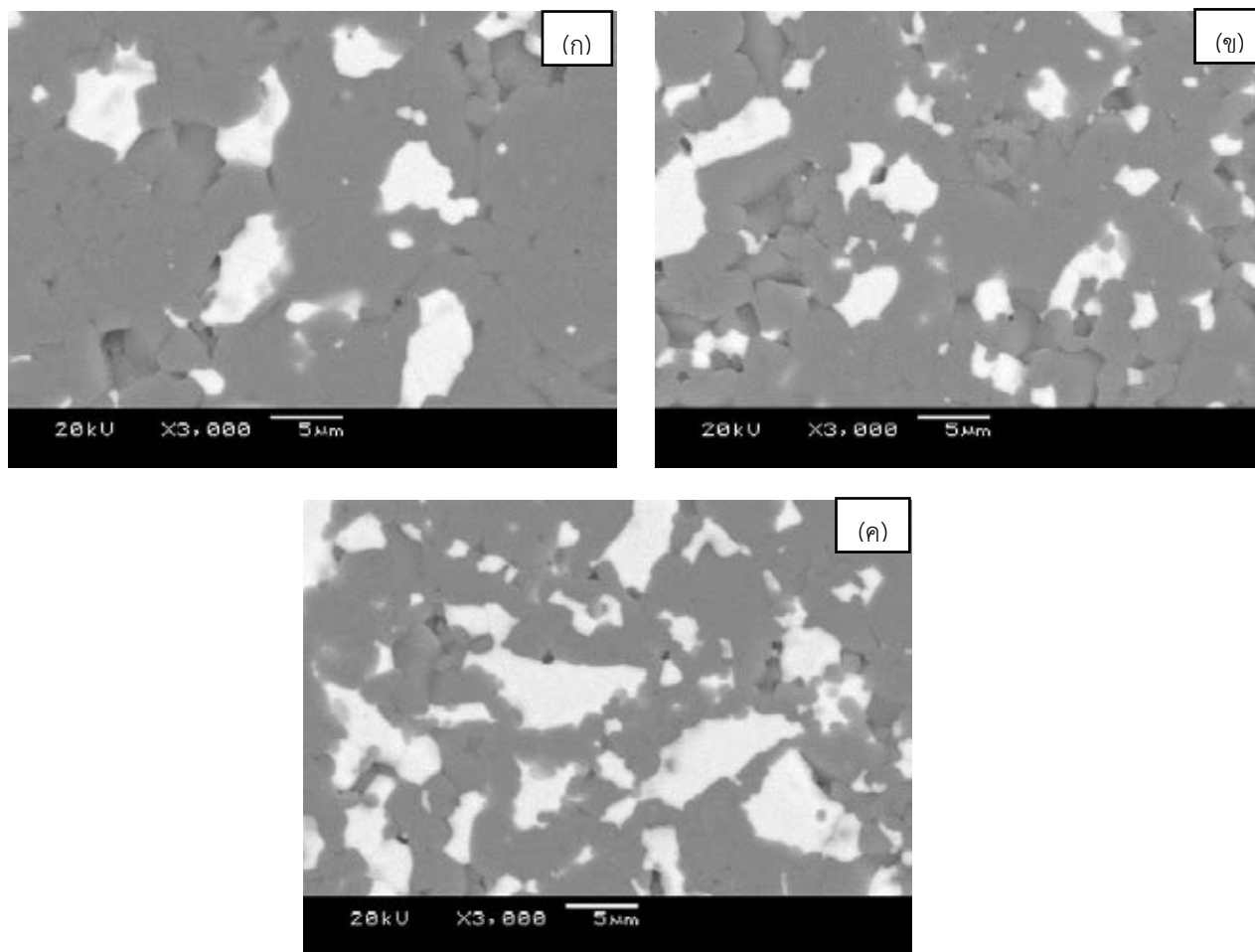
อุณหภูมิการเผาผนึก (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	การหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)
1450	61.14±0.77	10.18±0.35	4.02±0.11
1500	60.78±0.78	10.32±0.39	4.79±0.24
1550	70.04±1.16	6.79±0.34	7.70±0.28
1600	70.97±0.83	6.38±0.30	8.03±0.10
1650	72.92±1.28	5.64±0.47	9.01±0.32

4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิต

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนีย สามารถตรวจสอบได้จากเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 4.6 (ก-ค) และ 4.7 (ก-ค) แสดงให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของอะลูมินาและควิบิคเซอร์โคเนียที่อุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1550 และ 1600 องศาเซลเซียส การกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ และอนุภาคของเซอร์โคเนียบางส่วนมีการเกาะกันเป็นกลุ่มของอนุภาค (Agglomerate)



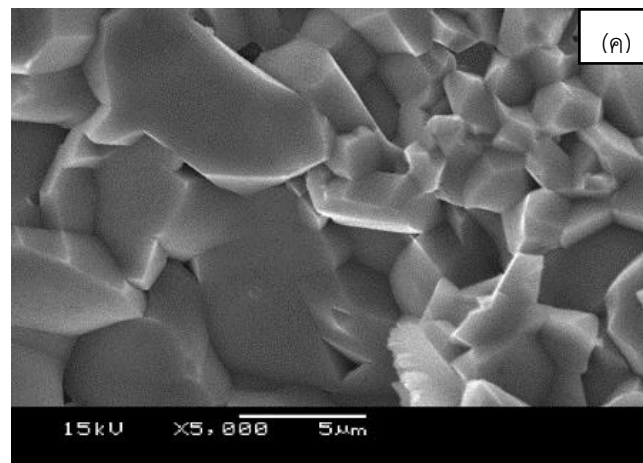
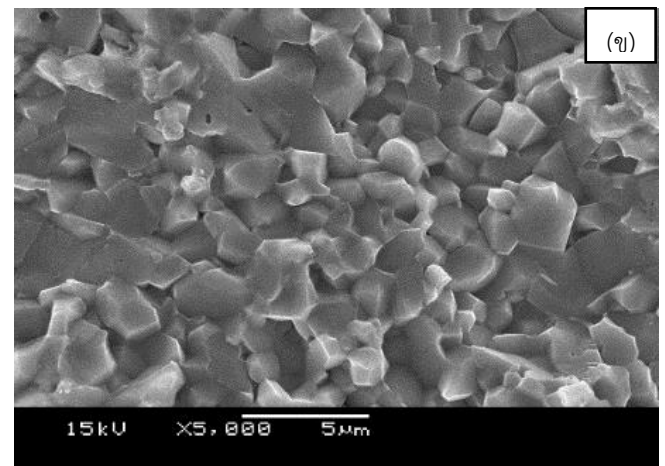
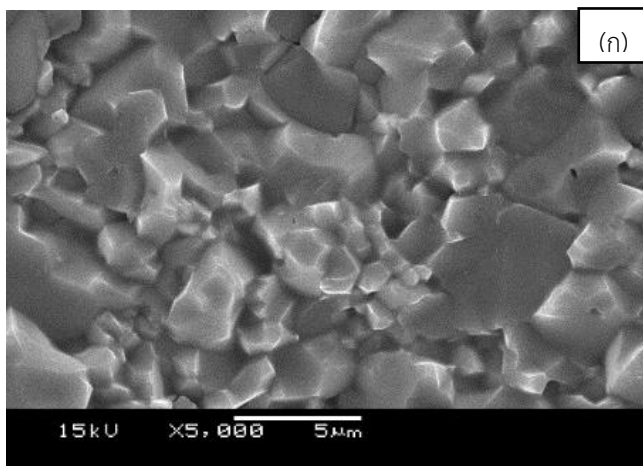
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เผาผนึกที่ 1550 องศาเซลเซียส
 (ก) อะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียอัตราส่วน 90:10 (ข) อะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียอัตราส่วน 80:20 และ
 (ค) อะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียอัตราส่วน 70:30



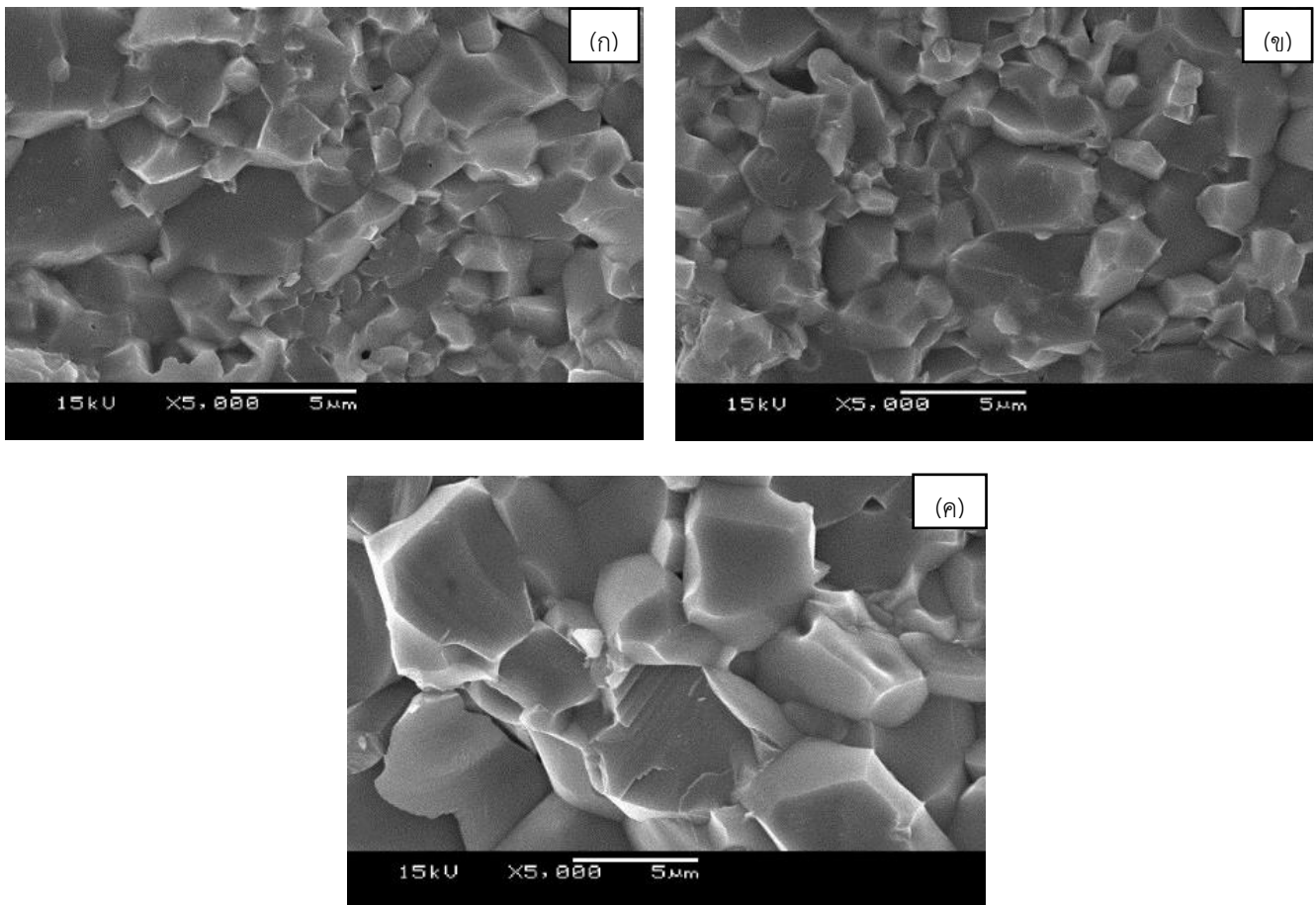
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-คัลเซียมไฮดรอกไซด์คอมโพสิตที่เผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส (ก) อะลูมินา-คัลเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วน 90:10 (ข) อะลูมินา-คัลเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วน 80:20 และ (ค) อะลูมินา-คัลเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วน 70:30

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 (ก-ค) แสดงให้เห็นพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานอะลูมินาที่อุณหภูมิเผาผนึก 1550, 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 2.87, 3.04 และ 4.51 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้มีอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคัลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 90:10 ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1550, 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส มีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 3.08, 3.55 และ 4.72 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 (ก-ค) เมื่อเพิ่มปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้มีอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคัลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 80:20 ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1550, 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส มีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 3.06, 3.16 และ 4.69 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 (ก-ค) และเมื่อเพิ่มปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้มีอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและคัลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 70:30 ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1550, 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส มีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 3.55, 3.78 และ 5.31 ไมครอน ดังรูปที่ 4.11 (ก-ค) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองทำให้

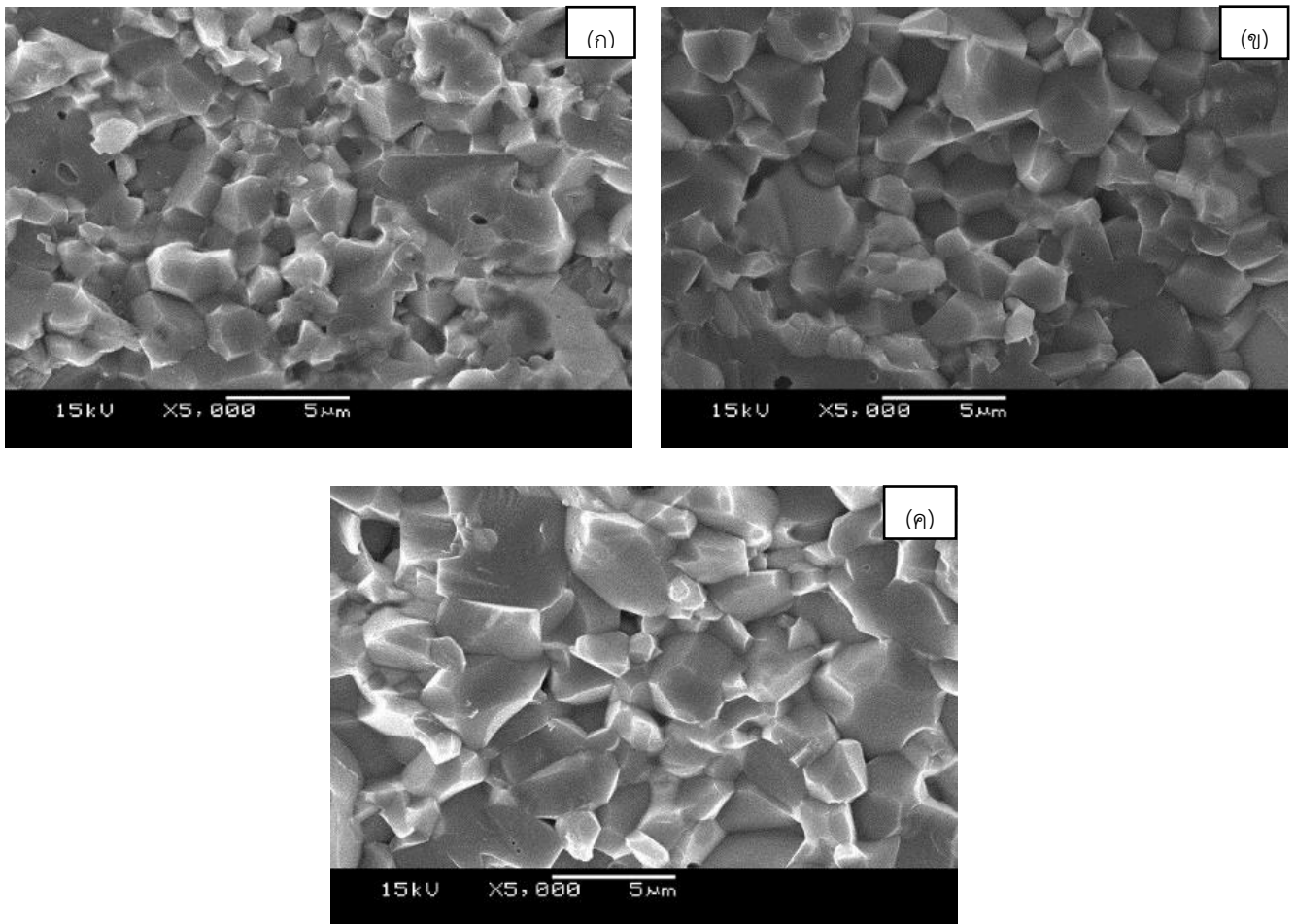
ทราบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาขึ้นสูงขึ้น ขนาดเกรนมีขนาดโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งช่วงอุณหภูมิการเผาที่
ที่เหมาะสมในการเผาเป็นคือที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยของอัตราส่วน
ระหว่างอะลูมินาและคิวบิกเซอร์โคเนีย 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 เท่ากับ 3.04, 3.55, 3.16 และ
3.78 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียสมีขนาดเกรนที่โตเกินไป โดยอาจเนื่องจาก
เกิดการขยายของเกรน ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส จึงไม่เหมาะสม
สำหรับการเตรียมชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต



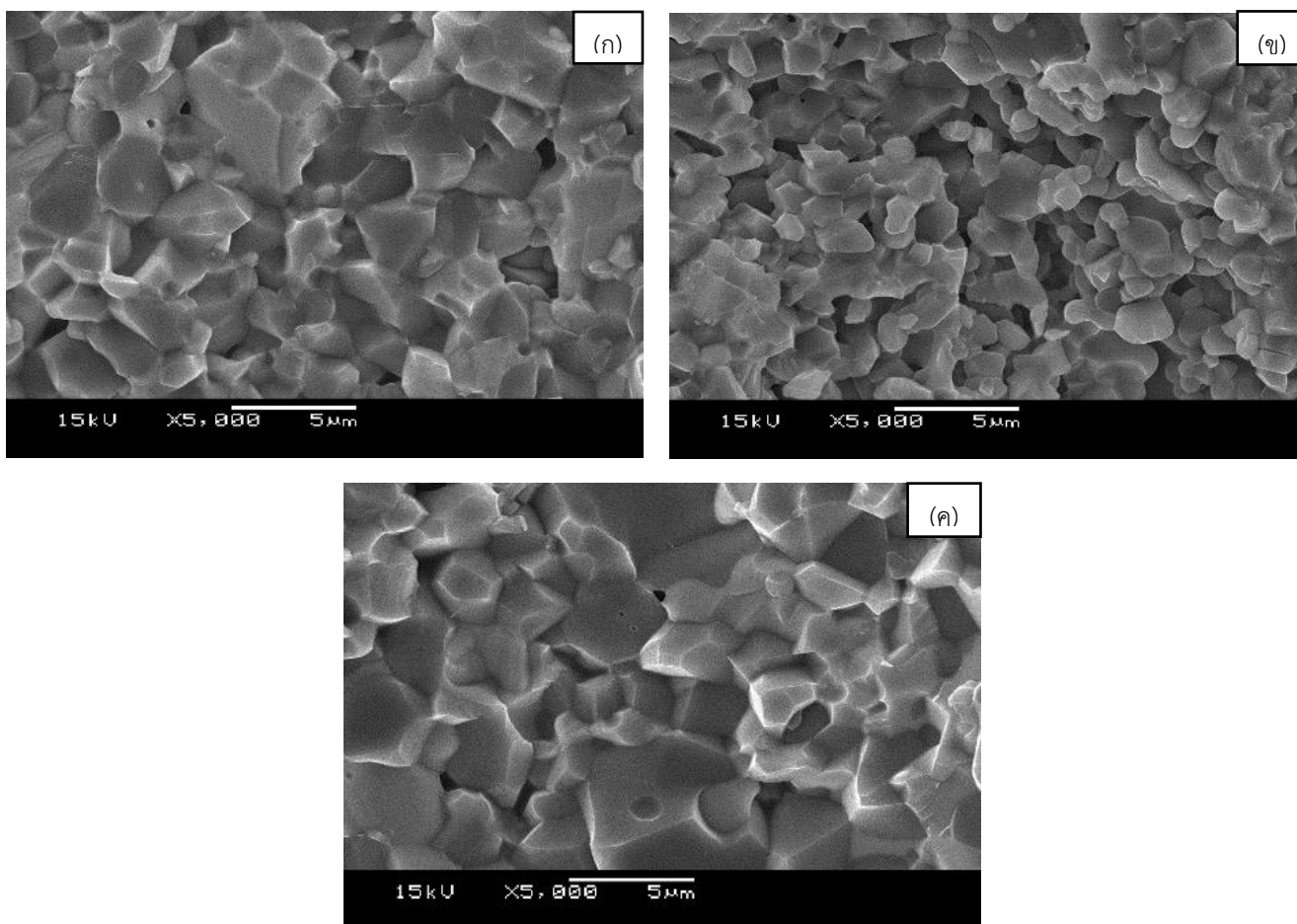
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 100:0
เผาที่ (ก) 1550 องศาเซลเซียส (ข) 1600 องศาเซลเซียส และ (ค) 1650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 90:10
เผาผนึกที่ (ก) 1550 องศาเซลเซียส (ข) 1600 องศาเซลเซียส และ (ค) 1650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-คิวิบิเคอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 80:20
แผ่นนี้ที่ (ก) 1550 องศาเซลเซียส (ข) 1600 องศาเซลเซียส และ (ค) 1650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อัตราส่วนเท่ากับ 70:30
 เภาพนิกที่ (ก) 1550 องศาเซลเซียส (ข) 1600 องศาเซลเซียส และ (ค) 1650 องศาเซลเซียส

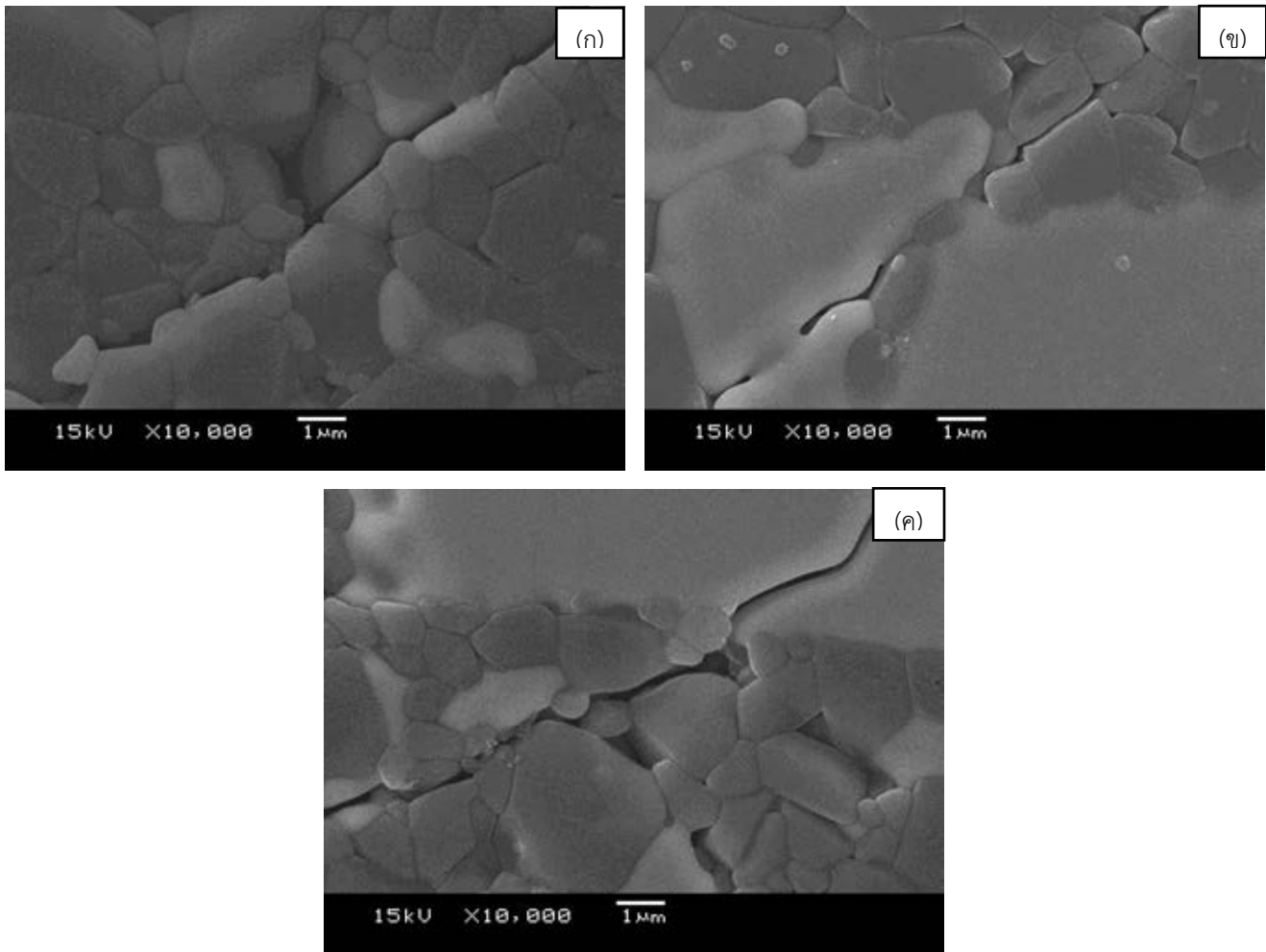
4.5 ความแข็งและความต้านทานต่อการแตกร้าวของชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต หลังผ่านการเผาพูนิกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า ช่วงอุณหภูมิการเผาพูนิกของวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่เหมาะสม ได้แก่ 1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อนำชิ้นงานดังกล่าวมาทำการทดสอบความแข็ง และความต้านทานต่อการแตกร้าว พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคิวบิกเซอร์โคเนียลงในอะลูมินาร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตลดลงแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยมีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ลดลงจาก 17.50 ± 0.53 จิกะพาสคัล เป็น 14.58 ± 0.49 จิกะพาสคัล และมีค่าความต้านทานการแตกร้าวลดลงจาก 5.75 ± 0.43 เมกะพาสคัล-เมตร^{1/2} เป็น 4.43 ± 0.56 เมกะพาสคัล-เมตร^{1/2} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมคิวบิกเซอร์โคเนียในปริมาณเพิ่มขึ้นนั้นไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลดังกล่าวของวัสดุอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตให้ดีขึ้นได้ และจากผลการทดสอบความแข็งจากการกดด้วย

เครื่อง Vicker's Hardness ส่งผลให้เกิดรอยร้าวเกิดขึ้นในชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.12 (ก-ค) ซึ่งเป็นรูปแสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส โดยรูปที่ 4.12 (ก) แสดงวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนอะลูมินาต่อคิวบิกเซอร์โคเนียเป็น 90:10 รูปที่ 4.12 (ข) แสดงวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนอะลูมินาต่อคิวบิกเซอร์โคเนียเป็น 80:20 และรูปที่ 4.12 (ค) แสดงวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนอะลูมินาต่อคิวบิกเซอร์โคเนียเป็น 70:30 จากรูปพบว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแตกแบบผ่ากลางเกรน (Transgranular fracture) และการแตกไปตามขอบเกรน (Intergranular fracture)

เมื่อพิจารณาจากสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นว่า การนำ Fully Stabilized Zirconia หรือ เซอร์โคเนียที่อยู่ในรูปโครงสร้างของคิวบิก ผสมกับอะลูมินาเป็นวัสดุคอมโพสิต จะสามารถเกิดกลไกความต้านทานการแตกร้าวได้ ซึ่งอธิบายได้จากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคิวบิกเซอร์โคเนียเท่ากับ 10.5×10^{-6} ถึง 11×10^{-6} องศาเซลเซียส⁻¹ โดยมีค่าสูงกว่าอะลูมินาที่มีค่าเท่ากับ 8.1×10^{-6} องศาเซลเซียส⁻¹ เมื่อได้รับความร้อนและเย็นตัวลง คิวบิกเซอร์โคเนียจะมีการหดตัวของเกรนมากกว่าอะลูมินา ทำให้เกิดช่องว่างและรอยร้าวรอบๆเกรนของคิวบิกเซอร์โคเนีย หรือ Pre-crack ในชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนีย โดยหากเกิดกลไกดังกล่าวขึ้น Pre-crack จะสามารถยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวได้ หรืออีกกรณีคือรอยร้าวที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแตกไปตามขอบเกรน แต่จากรูปที่ 4.12 (ก-ค) พบว่าไม่เกิดรอยร้าวในลักษณะ Pre-crack ขึ้นในชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิต ดังนั้นจากผลการทดสอบจึงแสดงให้เห็นว่าไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ในงานวิจัยเรื่องนี้ ดังนั้นการนำคิวบิกเซอร์โคเนียผสมกับอะลูมินาเป็นวัสดุคอมโพสิตในปริมาณเพิ่มขึ้นนี้ จะทำให้ความสามารถในการเผาผนึกของชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตลดลง ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตลดลงตามไปด้วย ตารางที่ 4.3 สมบัติของชิ้นงานอะลูมินา-คิวบิกเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ปริมาณสารตั้งต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		ความแข็งแบบวิกเกอร์ (จิกะพาสคัล)	ความต้านทานการแตกร้าว (เมกะพาสคัล·เมตร ^{1/2})
อะลูมินา	คิวบิก เซอร์โคเนีย		
100	0	17.50±0.53	5.75±0.43
90	10	16.35±0.70	4.83±0.46
80	20	16.40±1.03	4.42±0.15
70	30	14.58±0.49	4.43±0.56



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส

(ก) วัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนอะลูมินาต่อควิบิคเซอร์โคเนียเท่ากับ 90:10

(ข) วัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนอะลูมินาต่อควิบิคเซอร์โคเนียเท่ากับ 80:20

(ค) วัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนอะลูมินาต่อควิบิคเซอร์โคเนียเท่ากับ 70:30

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและควิบิคเซอร์โคเนียต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเผาผนึกของอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอะลูมินาต่อควิบิคเซอร์โคเนีย ได้แก่ 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 ภายใต้อุณหภูมิการเผาผนึก ได้แก่ 1450 1500 1550 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาผนึกของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิต คือ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงซึ่งหากเผาผนึกในช่วงที่สูงกว่าอุณหภูมินี้ อาจทำให้เกรนเกิดการโตส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง

2) การเติมควิบิคเซอร์โคเนียไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้ ซึ่งชิ้นงานมีสมบัติที่ดีที่สุด ได้แก่ ชิ้นงานอะลูมินาที่ไม่เติมควิบิคเซอร์โคเนีย ภายใต้อุณหภูมิการเผาผนึกเท่ากับ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวัสดุอะลูมินาที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ ร้อยละ 98.65 ± 9.68 มีค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 469.97 ± 38.31 เมกะพาสคัล มีค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์เท่ากับ 17.50 ± 0.53 จิกะพาสคัล และมีค่าความต้านทานการแตกร้าวเท่ากับ 5.75 ± 0.43 เมกะพาสคัล-เมตร^{1/2}

3) ชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด คือ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาต่อควิบิคเซอร์โคเนียเท่ากับ 90:10 โดยวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 98.04 ± 1.91 มีค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 450.96 ± 34.30 เมกะพาสคัล มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 16.35 ± 0.70 จิกะพาสคัล และมีค่าความต้านทานการแตกร้าวเท่ากับ 4.83 ± 0.46 เมกะพาสคัล-เมตร^{1/2}

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและทดลองนี้สามารถปรับปรุงและพัฒนาขั้นต่อไปได้ดังนี้

1) การศึกษาวิธีการดำเนินงานงานวิจัย โดยการเพิ่มเวลาการผสมวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธี wet ball mill เป็นเวลาที่มากกว่า 1 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาค การกระจายตัวของควิบิคเซอร์โคเนียในอะลูมินายังไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งมีขนาดเกรนที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเกรนของอะลูมินา จึงเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิตลดลง

2) การศึกษาการลดสิ่งเจือปนในองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุควิบิคเซอร์โคเนียที่นำมาทำวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากควิบิคเซอร์โคเนียเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเจียรนัยเพชรควิบิคเซอร์โคเนีย โดยมีสารประกอบอื่นผสมอยู่ค่อนข้างมาก เช่น อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3)

แอฟเรียมออกไซด์ (HfO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นต้น ซึ่งสารประกอบเหล่านี้อาจทำให้สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ได้ลดลง

เอกสารอ้างอิง

1. ทฤทท์ กิรติเสว. 2552. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสาร มก. 22(70): 18-32.
2. สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล. 2552. อะลูมินา วัสดุสารพัดประโยชน์[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/FEBRUARY/RADIO2-5.HTM> [24 เม.ย. 2561]
3. Worrall, W.E. 1986. Clay and Ceramic Raw Materials. Halsted Press, 151-152.
4. สมชาย พวงเพิกคิก. 2518. กระบวนการเบเยอร์[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book> [24 เม.ย. 2561]
5. Guichon, V. 1921. Manufacturing process of Alumina[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://guichon-valves.com/faqs/alumina-manufacturing-process-of-alumina/> [24 เม.ย. 2561]
6. Kanokporn. 2518. เซอร์โคเนีย[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.rsu.ac.th/engineer/> [24 เม.ย. 2561]
7. Gowida, M.A., and Aboushelib, M.N. 2006 Bonding to Zirconia (A Systematic Review). Journal Dental Science. 1(1): 21-42.
8. CZlover. 2543. รู้จักเพชร Cubic Zirconia[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.stonelover.com/shop/index.php?option=com> [24 เม.ย. 2561]
9. PROUD COSTUME JEWELRY. 2559. เพชร Cubic Zirconia[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.proudcostumejewelry.com/content/9118> [25 เม.ย. 2561]
10. อนุรักษ์ ภูวานคำ. 2548. การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-มัลไทท์-เซอร์โคเนีย สำหรับงานทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
11. Ashish, G. 2016. Microstructure and Thermal Conductivity of Liquid Feedstock Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings Scientific [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.researchgate.net/figure/Phase-diagram-of-zirconia> [25 เม.ย. 2561]
12. สุขเกษม กังวานตระกูล. 2554. การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเซรามิกชีวภาพไฮดรอกซีแอปพาไทต์-อะลูมินาด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
13. สุธี วัฒนศิริเวช. 2541. Advanced ceramics. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload> [24 เม.ย. 2561]
14. Heidy, L. Calamabas, P., and María, P.A. 2015. Sintering and Microstruture of Al₂O₃ and Al₂O₃-ZrO₂ Ceramics. Procedia Materials Science 8: 180-189

15. Marijana, M.R. Lidija, C., and Krešimir G. 2015. Erosion Resistance of Slip Cast Composite Al_2O_3 - ZrO_2 Ceramics. Procedia Engineering 100: 1133–1140
16. กัณฑ์มา เหมรา. 2546. วัสดุเชิงประกอบระหว่างอะลูมินา-เซอร์โคเนียโดยใช้ผงวัตถุดิบราคาถูก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลจากเทคนิควิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค
ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Particle Size Distribution, PSD)

ภาคผนวก ก -1 : วัสดุอะลูมินา P172SB



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Alumina0.4micron - Average
Sample Source & type:
Sample bulk lot ref:

SOP Name:
Measured by:
User
Result Source:
Averaged

Measured:
10 May 2019 09:25:47
Analysed:
10 May 2019 09:25:48

Particle Name:
Alumina
Particle RI:
1.780
Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000SM (A)
Absorption:
0.1
Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose
Size range:
0.020 to 2000.000 um
Weighted Residual:
1.714 %

Sensitivity:
Normal
Obscuration:
14.47 %
Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0017 %Vol

Span :
11.456

Uniformity:
3.2

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
7.79 m²/g

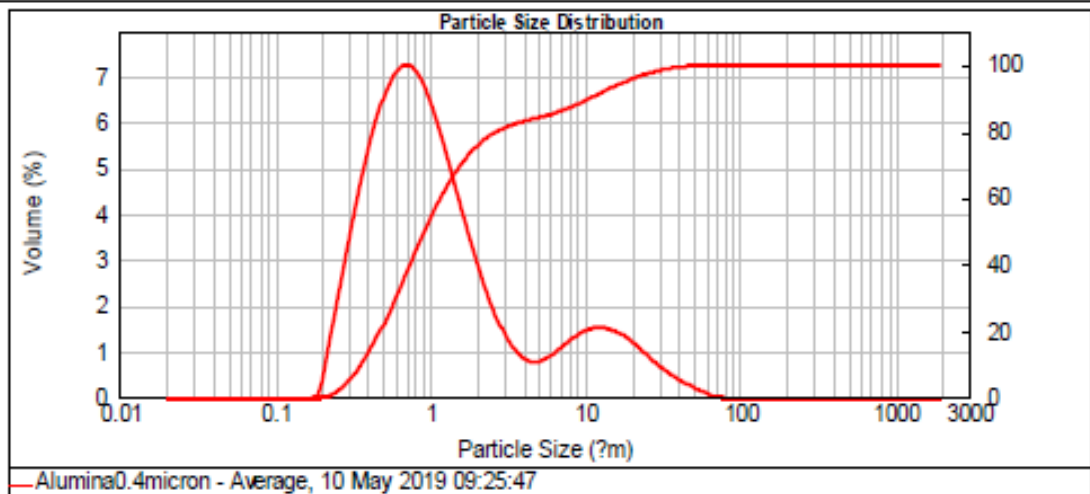
Surface Weighted Mean D[3,2]:
0.770 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
3.468 um

d(0.1): 0.361 um

d(0.5): 0.913 um

d(0.9): 10.819 um



ภาคผนวก ก - 2 : วัสดุอะลูมินา P122SB



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Alumina2.5micron - Average

SOP Name:

Measured:
10 May 2019 09:38:40

Sample Source & type:

Measured by:
User

Analysed:
10 May 2019 09:38:41

Sample bulk lot ref:

Result Source:
Averaged

Particle Name:
Alumina

Accessory Name:
Hydro 2000SM (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1.780

Absorption:
0.1

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
15.80 %

Dispersant Name:
Water

Dispersant RI:
1.330

Weighted Residual:
1.325 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0046 %Vol

Span :
1.958

Uniformity:
0.673

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
2.6 m²/g

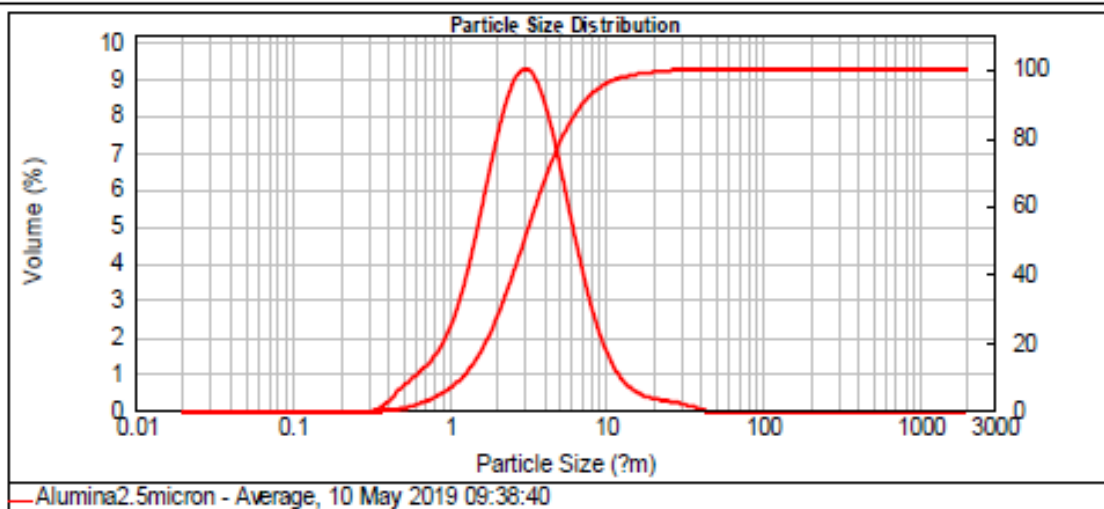
Surface Weighted Mean D[3,2]:
2.306 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
3.868 um

d(0.1): 1.212 um

d(0.5): 2.990 um

d(0.9): 7.067 um



ภาคผนวก ก - 3 : วัสดุอะลูมินา AC34B4



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Alumina4micron - Average

SOP Name:

Measured:
10 May 2019 16:58:24

Sample Source & type:

Measured by:
User

Analysed:
10 May 2019 16:58:25

Sample bulk lot ref:

Result Source:
Averaged

Particle Name:
Alumina

Accessory Name:
Hydro 2000SM (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1.780

Absorption:
0.1

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
10.86 %

Dispersant Name:
Water

Dispersant RI:
1.330

Weighted Residual:
0.991 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0052 %Vol

Span :
3.052

Uniformity:
0.98

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
1.64 m²/g

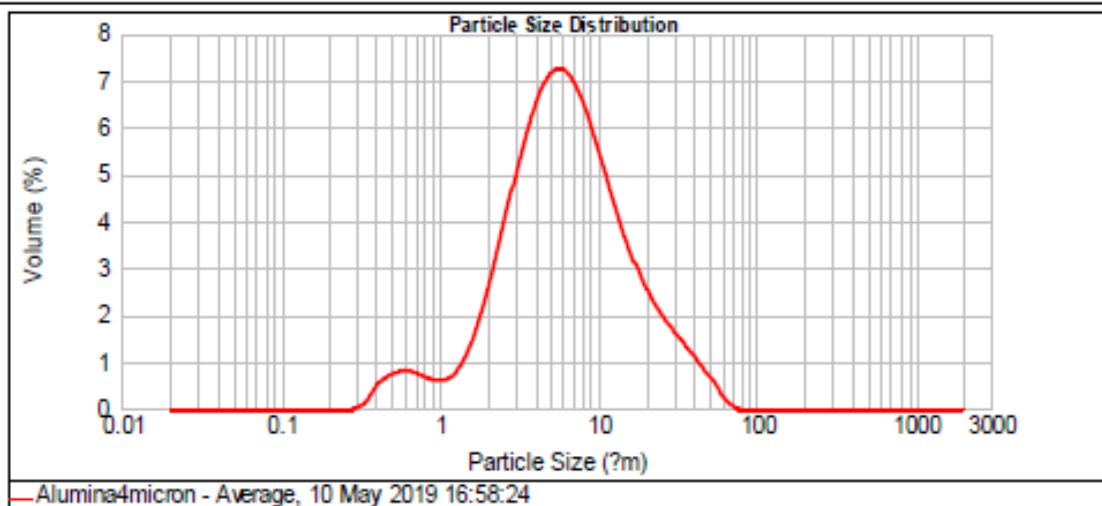
Surface Weighted Mean D[3,2]:
3.659 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
9.145 um

d(0.1): 1.976 um

d(0.5): 6.013 um

d(0.9): 20.324 um



ภาคผนวก ก - 4 : วัสดุควิบิคเซอร์โคเนีย



MASTERSIZER

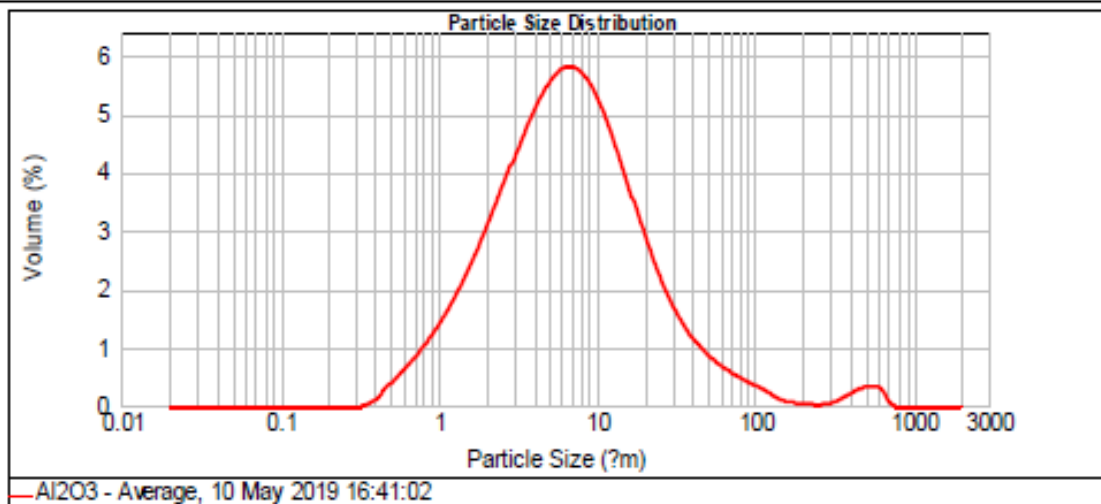


Result Analysis Report

Sample Name: Al2O3 - Average	SOP Name:	Measured: 10 May 2019 16:41:02
Sample Source & type:	Measured by: User	Analysed: 10 May 2019 16:41:03
Sample bulk lot ref:	Result Source: Averaged	

Particle Name: zirconia	Accessory Name: Hydro 2000SM (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 2.130	Absorption: 0.01	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 13.94 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.479 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0083 %Vol	Span : 3.995	Uniformity: 2.27	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.283 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.732 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 17.898 um	

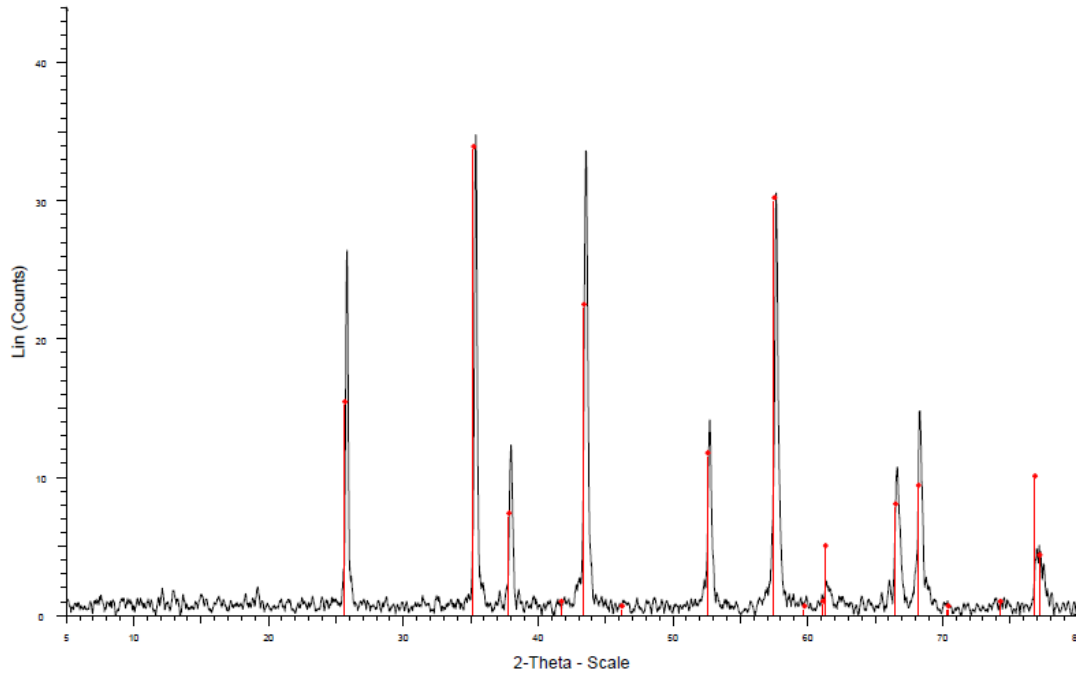
d(0.1): 1.585 um d(0.5): 6.457 um d(0.9): 27.379 um



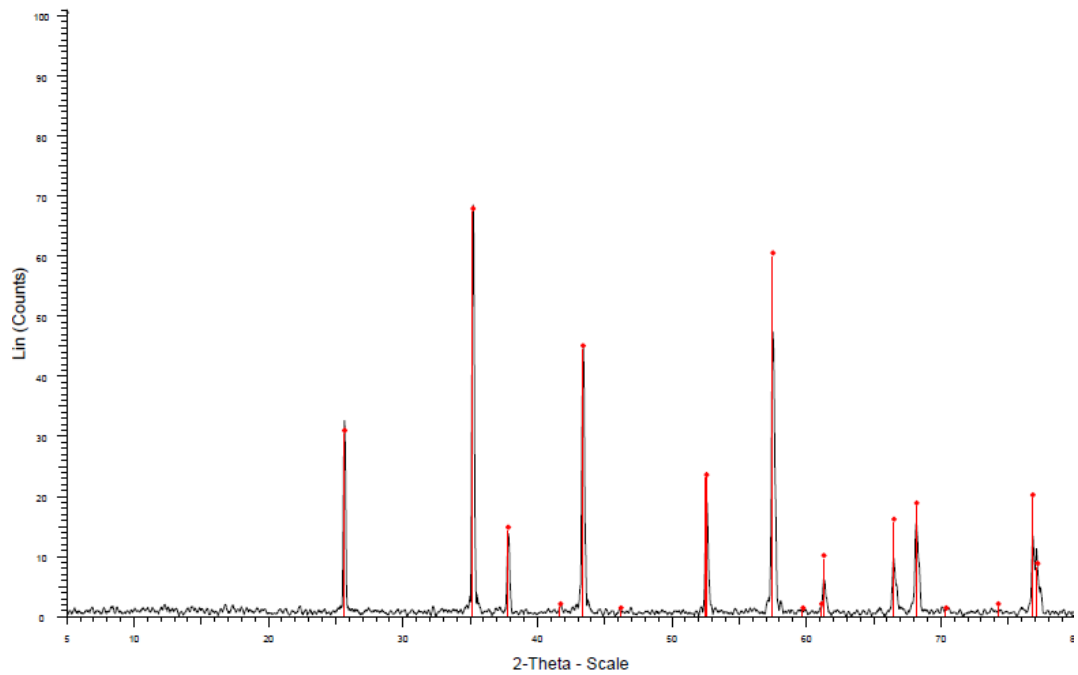
ภาคผนวก ข

ผลจากเทคนิควิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบโครงสร้างผลึก
ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

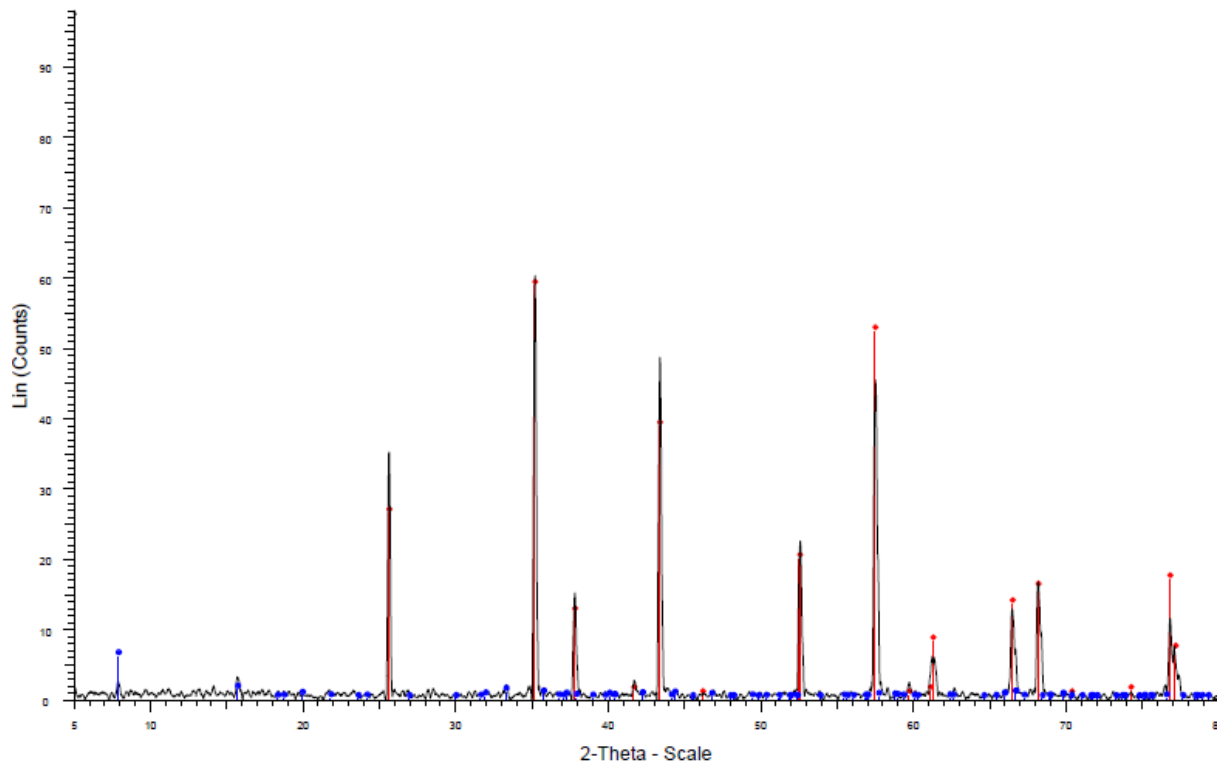
ภาคผนวก ข - 1 : วัสดุอะลูมินา P172SB



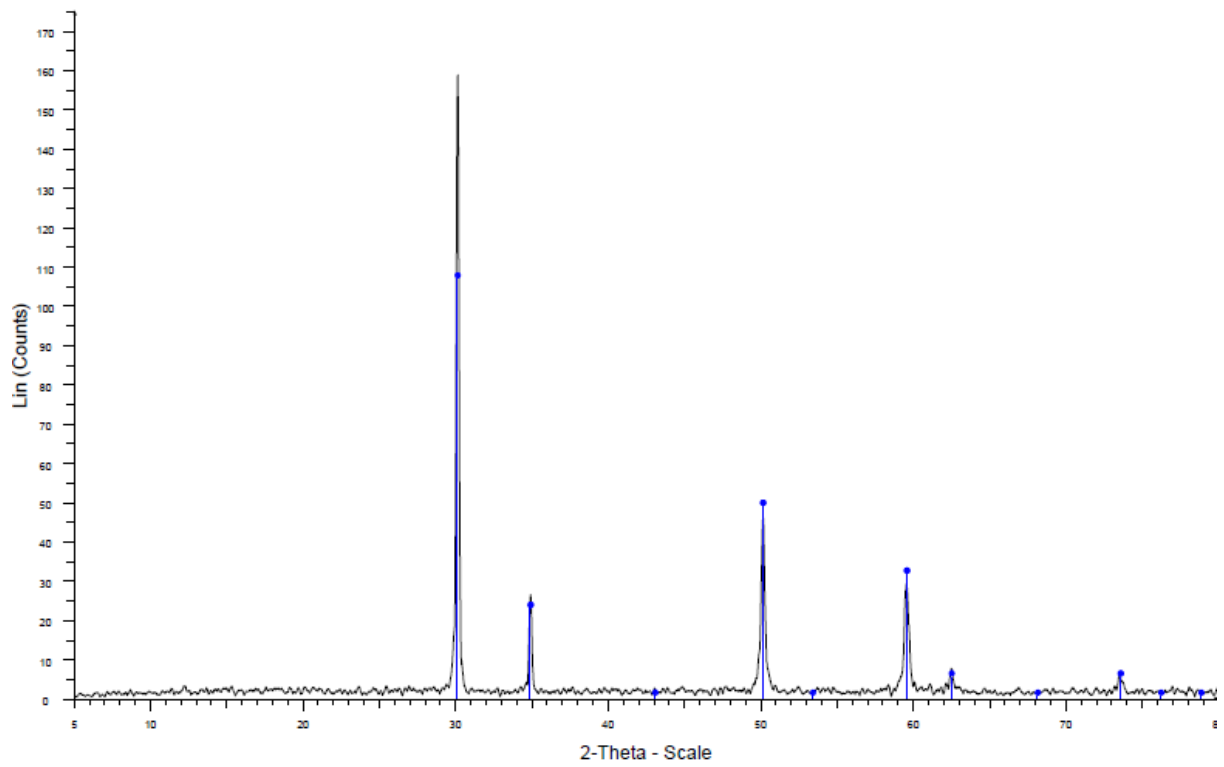
ภาคผนวก ข - 2 : วัสดุอะลูมินา P122SB



ภาคผนวก ข - 3 : วัสดุอะลูมินา AC34B4

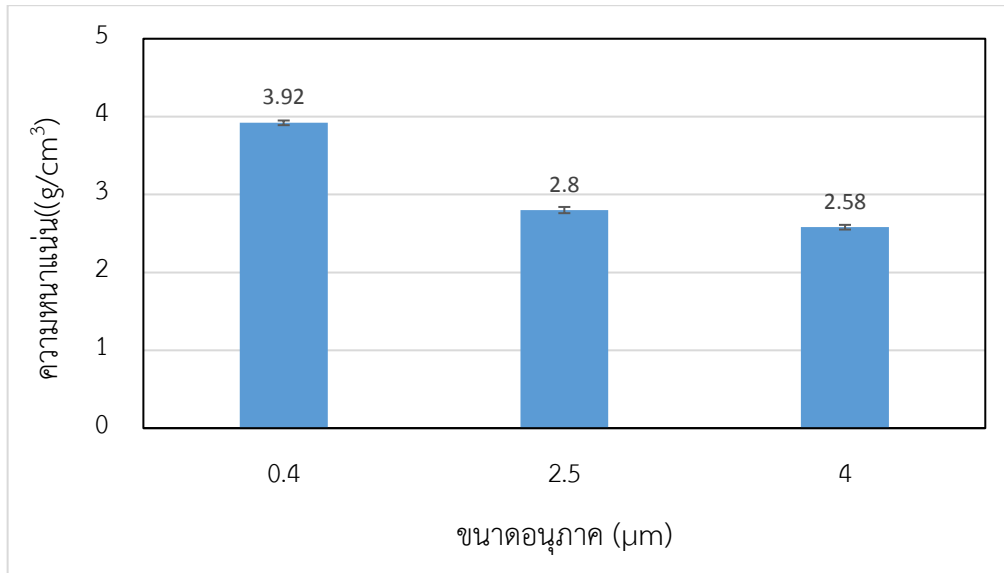


ภาคผนวก ข- 4 : วัสดุคิวบิกเซอร์โคเนีย

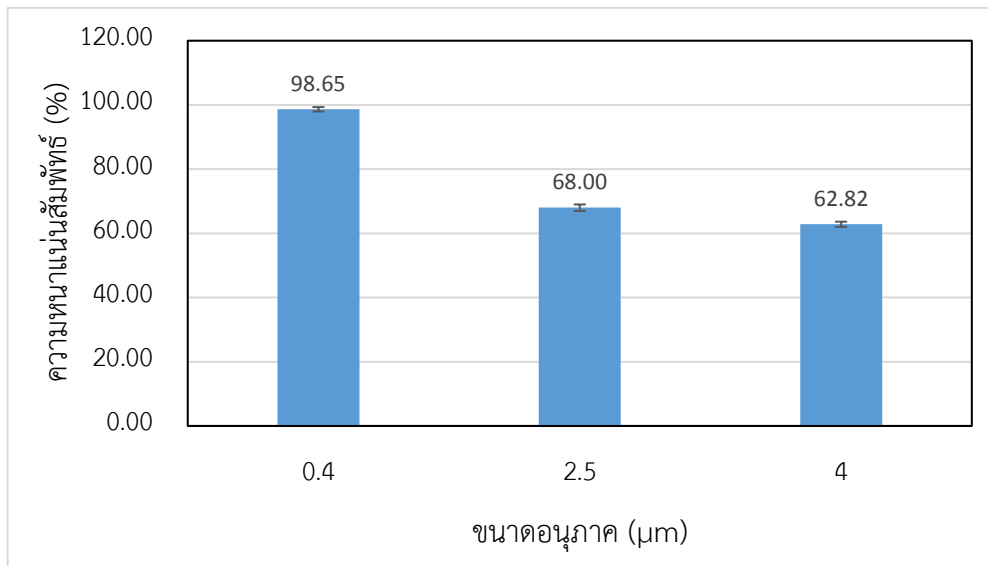


ภาคผนวก ค
สมบัติของชิ้นงานอะลูมินาหลังผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

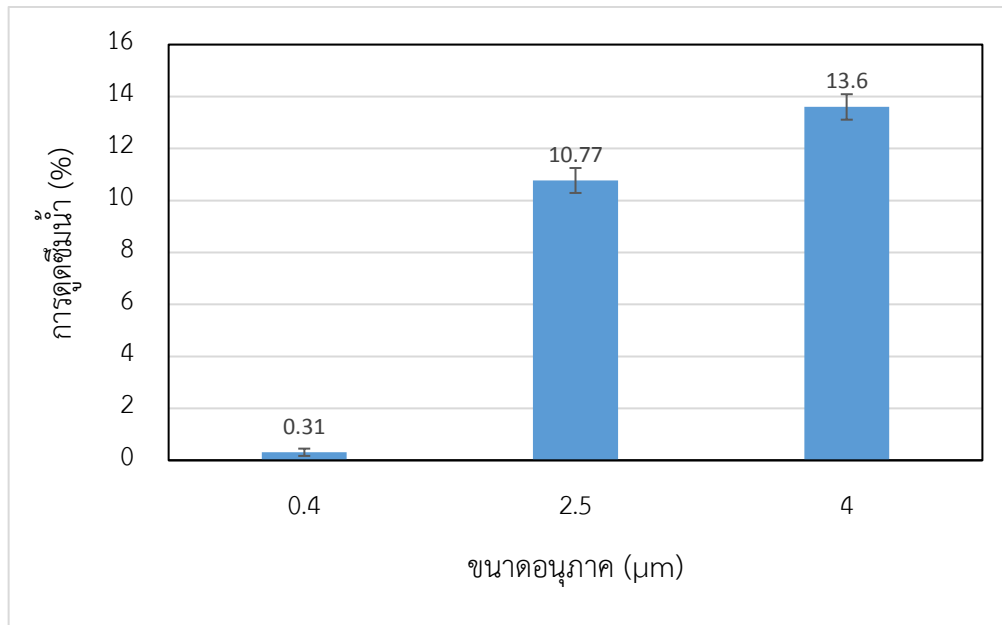
ภาคผนวก ค - 1 : ความหนาแน่น



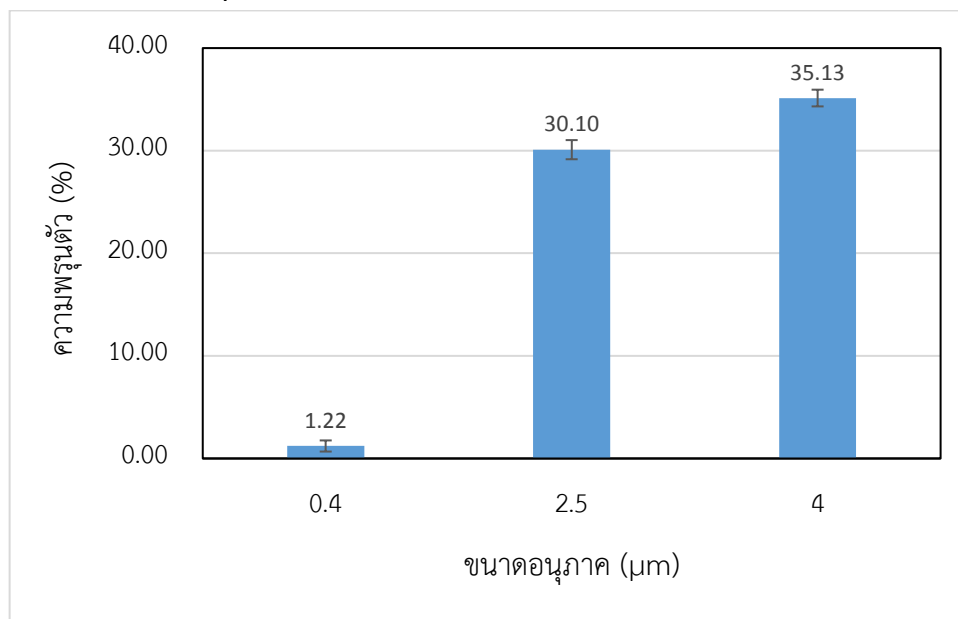
ภาคผนวก ค - 2 : ความหนาแน่นสัมพัทธ์



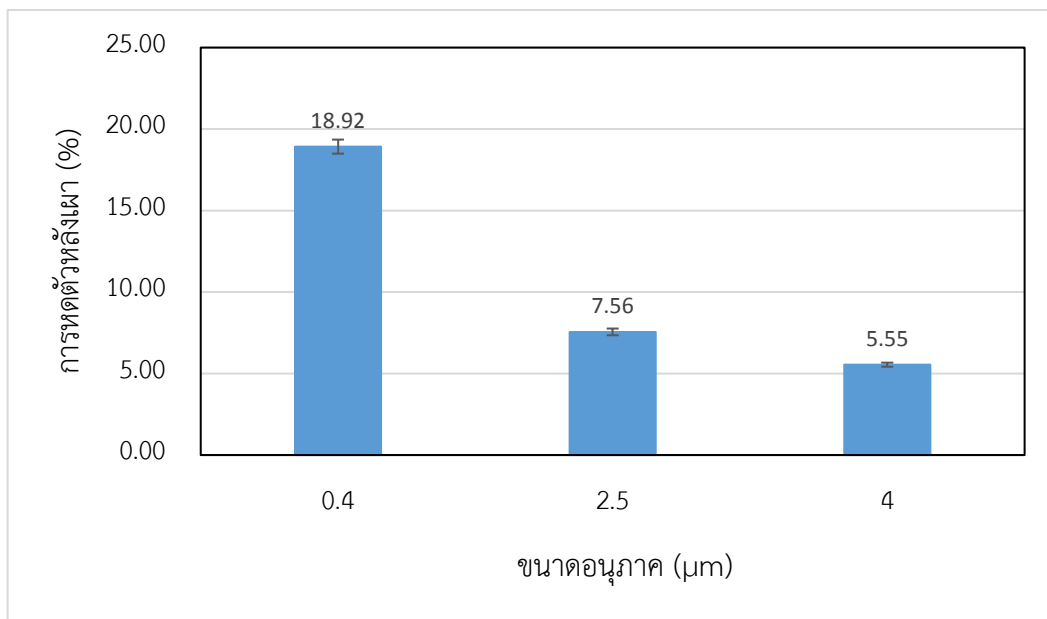
ภาคผนวก ค - 3 : การดูดซึมน้ำ



ภาคผนวก ค - 4 : ความพรุนตัว



ภาคผนวก ค - 5 : การหัดตัวหลังเผา



ภาคผนวก ง

สมบัติของชิ้นงานอะลูมินา-ควิบิคเซอร์โคเนียคอมโพสิต

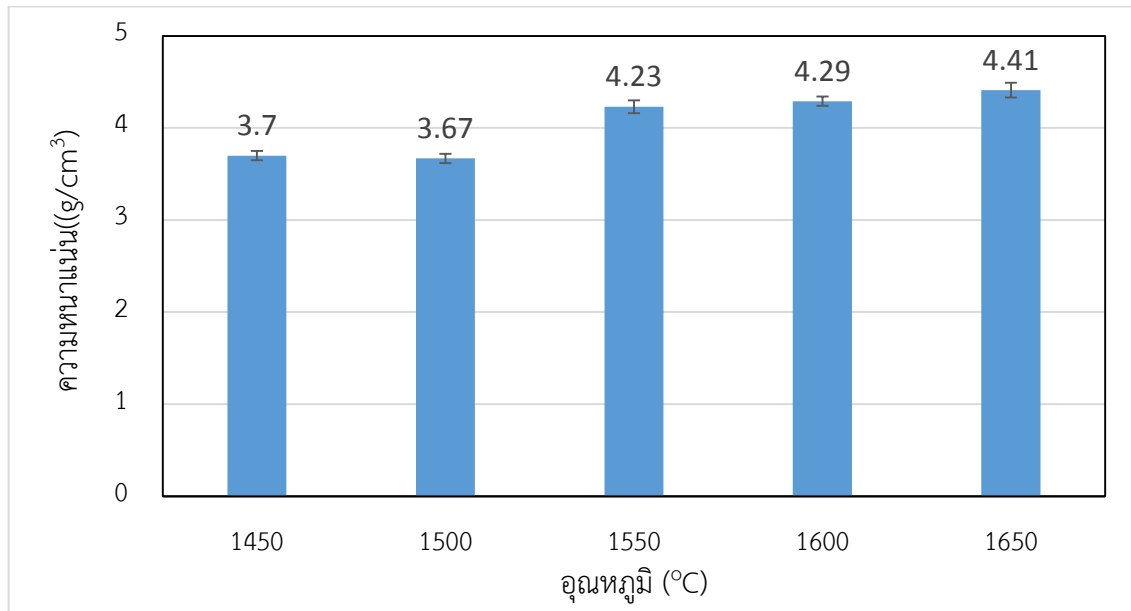
หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ปริมาณสารตั้งต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		อุณหภูมิการเผา พูนิก (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น สัมพัทธ์ (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	การหดตัวหลัง เผา (ร้อยละ)	ความต้านแรงดัด (เมกะพาสคัล)
อะลูมินา	ควิบิค เซอร์โคเนีย						
100	0	1450	3.40±0.06	85.72±1.53	4.51±0.59	14.25±0.12	264.36±50.44
90	10		3.29±0.08	79.92±1.87	6.04±0.66	12.38±0.62	289.17±15.89
80	20		3.29±0.13	77.18±3.05	6.99±1.31	11.37±0.50	189.51±46.91
70	30		3.34±0.08	75.42±1.78	7.15±0.76	9.83±0.28	175.42±27.39
100	0	1500	3.48±0.04	87.65±0.91	3.54±0.24	14.97±0.27	257.75±51.57
90	10		3.49±0.05	84.84±1.11	4.31±0.39	14.05±0.33	243.96±35.16
80	20		3.40±0.09	79.82±2.00	5.86±0.71	12.57±0.38	202.57±25.00
70	30		3.42±0.09	77.24±2.06	6.54±0.78	11.28±0.41	144.30±62.25
100	0	1550	3.88±0.04	97.72±0.96	0.40±0.27	18.49±0.33	487.96±48.71
90	10		4.03±0.04	97.93±0.86	0.35±0.0	17.76±0.16	415.21±24.50
80	20		4.136±0.05	96.93±1.10	0.436±0.18	16.936±0.10	396.356±42.17
70	30		4.21±0.04	96.97±0.55	0.26±0.09	16.79±0.38	343.12±34.40
100	0	1600	3.92±0.03	98.65±0.68	0.31±0.14	18.92±0.43	469.97±38.31
90	10		4.05±0.08	98.40±1.91	0.32±0.13	18.50±0.40	450.96±34.30
80	20		4.16±0.04	97.66±0.89	0.31±0.17	17.32±0.24	405.71±31.28
70	30		4.29±0.02	96.97±0.55	0.26±0.09	16.79±0.38	343.12±34.40
100	0	1650	3.91±0.04	98.43±0.92	0.33±0.27	18.62±0.32	389.04±13.27
90	10		4.03±0.03	98.10±0.67	0.29±0.13	17.88±0.17	368.45±51.99
80	20		4.12±0.07	77.18±3.05	6.99±1.31	11.37±0.50	189.51±46.91
70	30		4.26±0.04	96.18±0.86	0.33±0.13	16.64±0.36	308.33±57.11

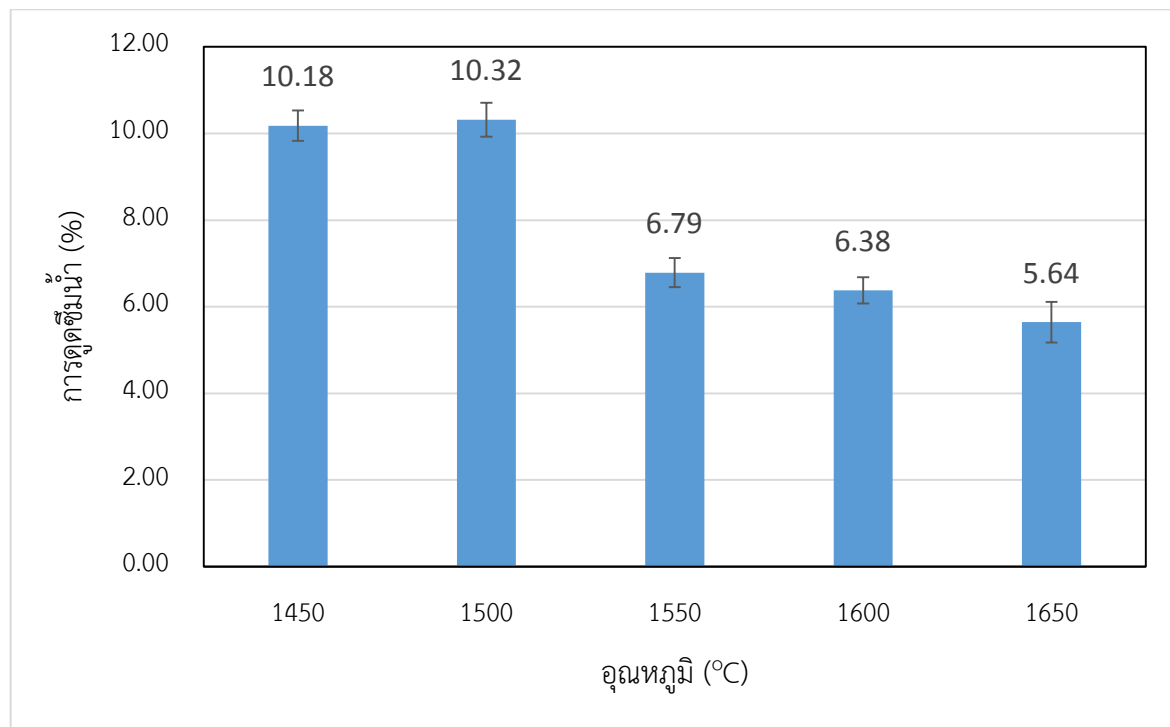
ภาคผนวก จ

สมบัติของชิ้นงานควิวิกเซอร์โคเนียหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1450-1650 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

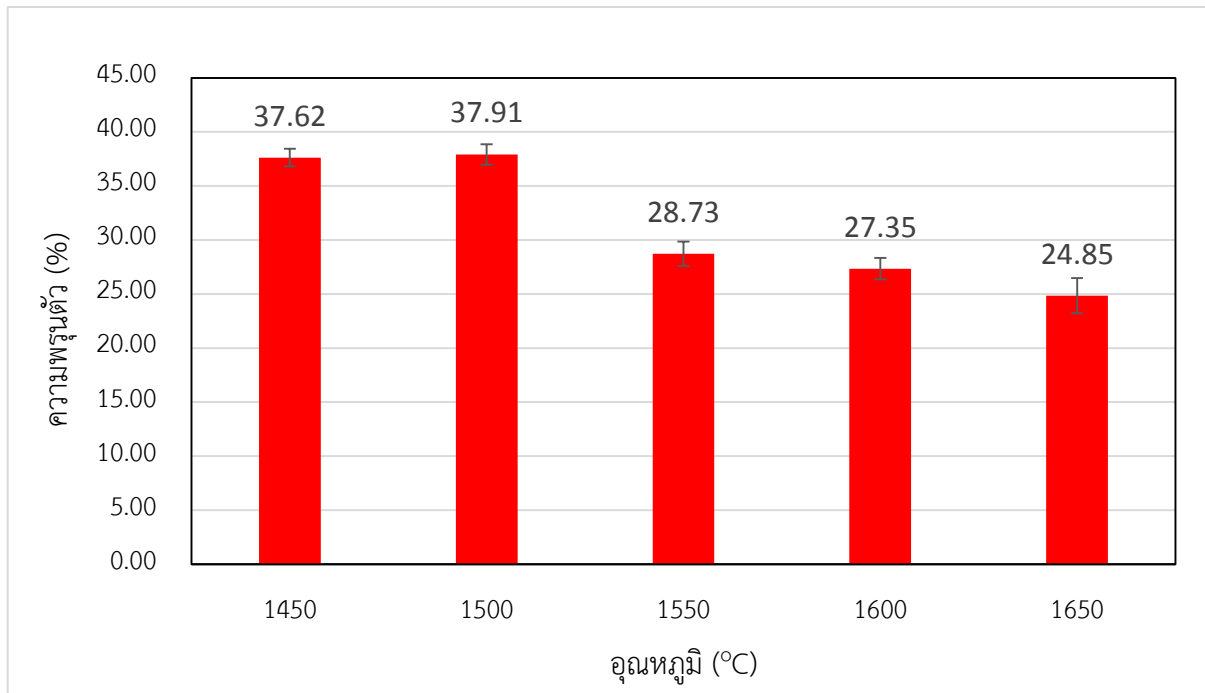
ภาคผนวก จ - 1 : ความหนาแน่น



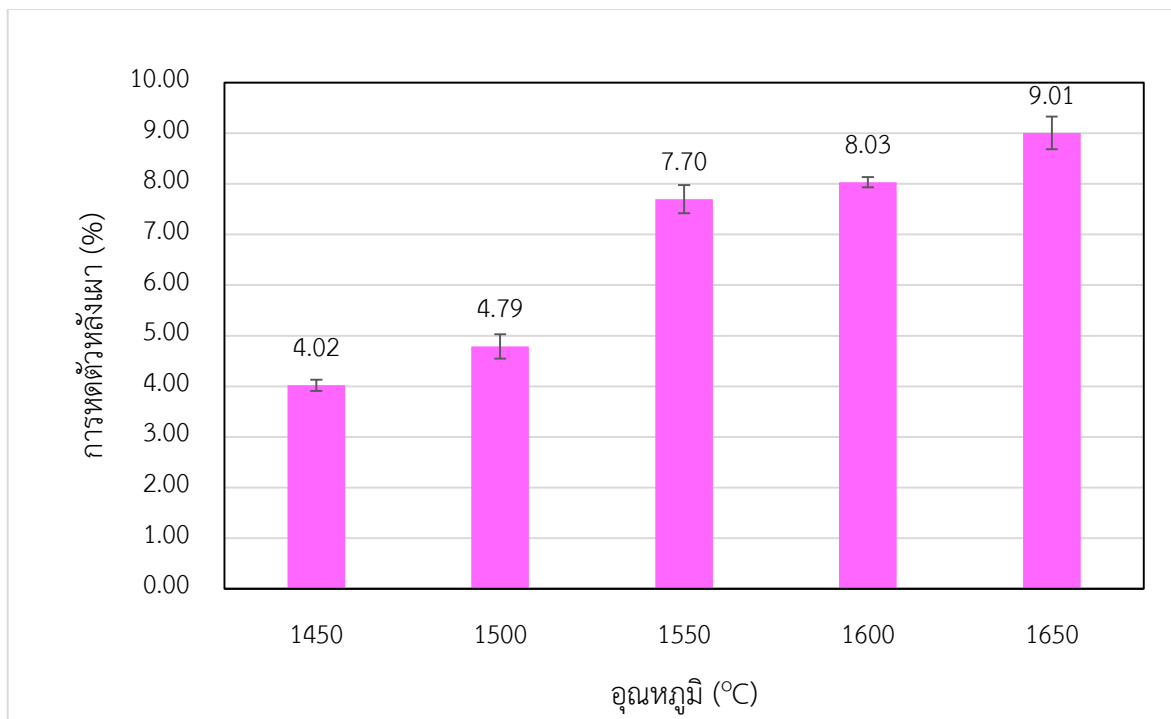
ภาคผนวก จ - 2 : ความหนาแน่นสัมพัทธ์



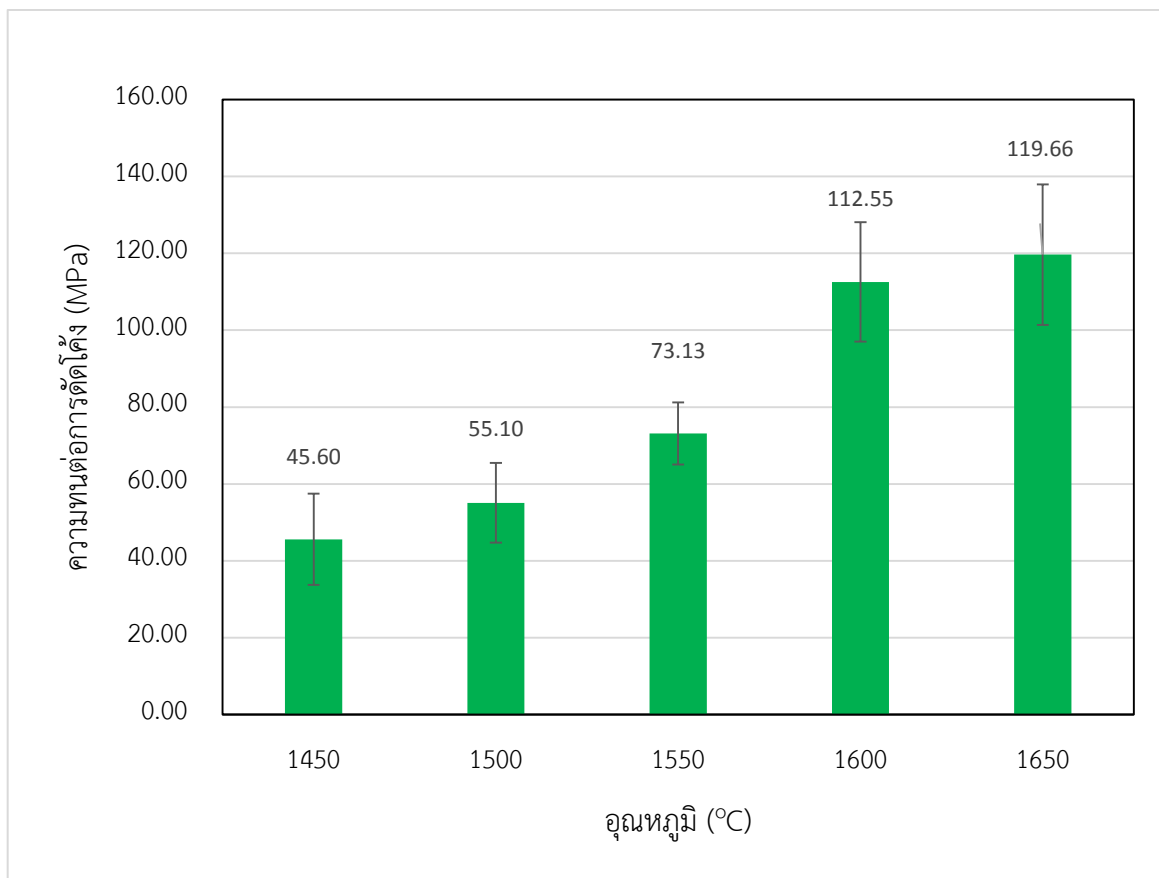
ภาคผนวก จ - 3 : ความพรุนตัว



ภาคผนวก จ - 4 : การหดตัวหลังเผา



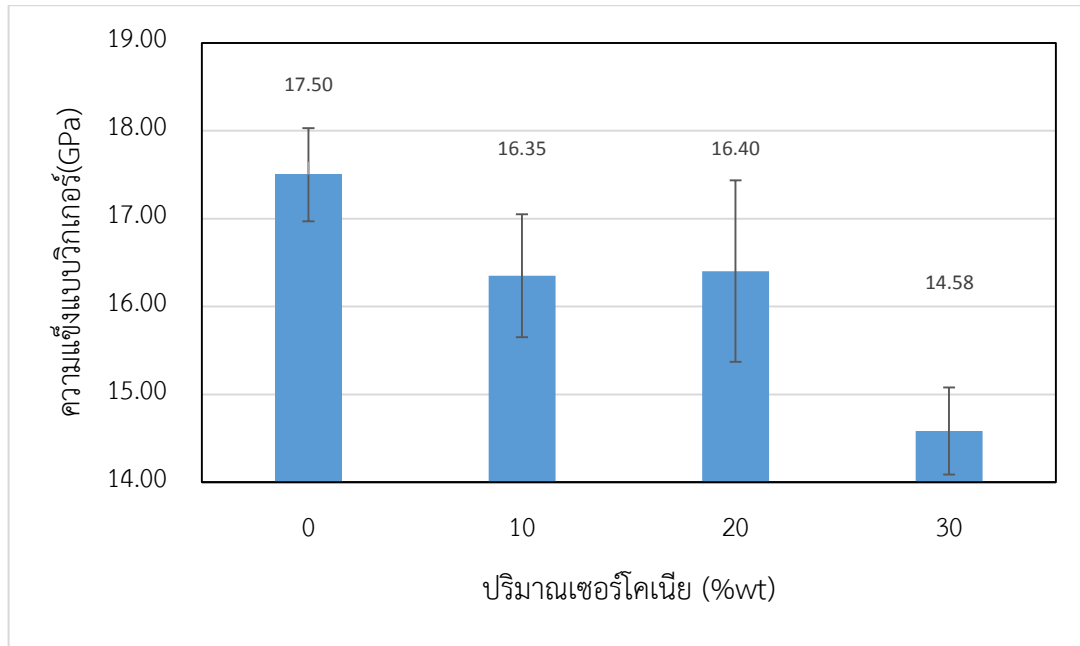
ภาคผนวก จ - 5 : การหดตัวหลังเผา



ภาคผนวก ฉ

ความแข็งและความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานอะลูมินา-ควิซเซอร์โคเนียคอมโพสิตหลังผ่าน
การเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ภาคผนวก ฉ - 1 : ความแข็งแบบวิกเกอร์



ภาคผนวก ฉ - 2 : ความต้านทานการแตกร้าว

