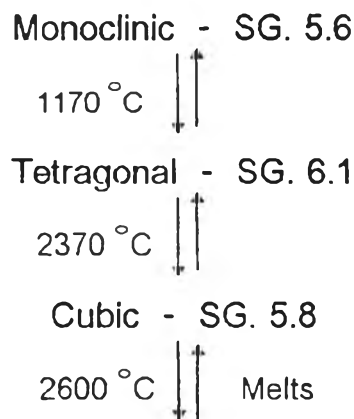


## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 โครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนีย

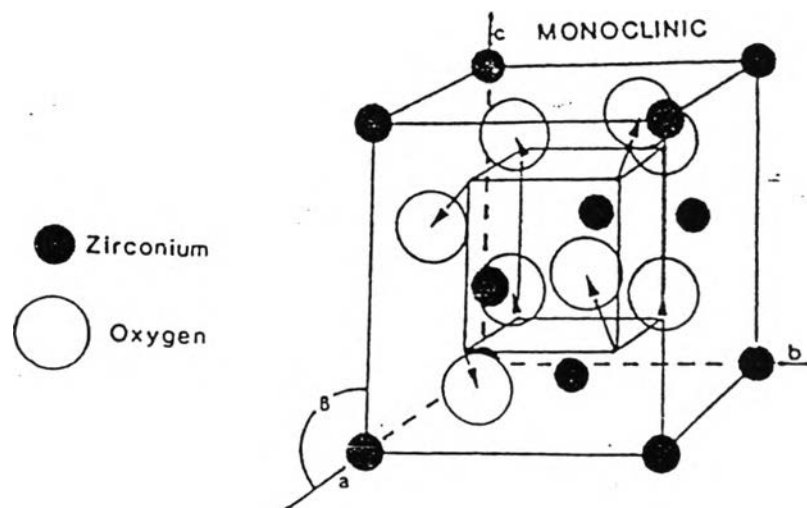
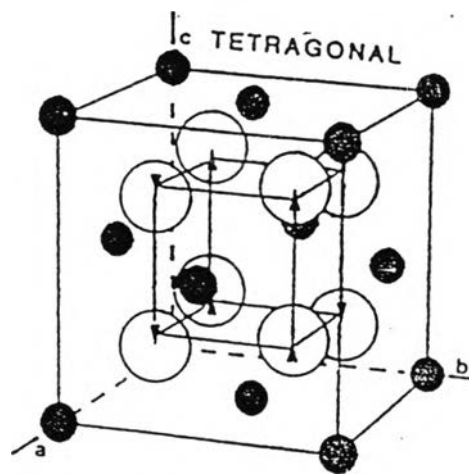
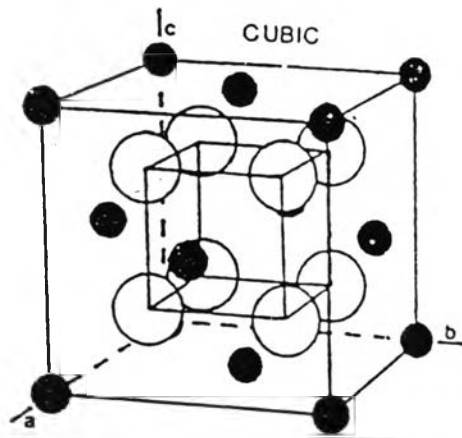
เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าเซอร์โคเนียบริสุทธิ์ (pure zirconia,  $ZrO_2$ ) มี 3 เฟส (phase) ซึ่งแต่ละเฟสจะเสถียร (stable) ที่อุณหภูมิต่างกันไป คือ เฟสของโมโนคลินิก (monoclinic, m), เตตระโกนอล (tetragonal, t) และ ลูกบาศก์ (cubic, c) ในเซอร์โคเนียบริสุทธิ์คิวบิกเฟสจะเสถียรที่อุณหภูมิ  $2370^\circ C$  ถึงจุดหลอมเหลว (melting point,  $2680 \pm 15^\circ C$ ) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงเตตระโกนอลเฟสจะเริ่มเสถียรที่อุณหภูมิ  $2370^\circ C$  จนถึง  $1170^\circ C$  และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า  $1170^\circ C$  โมโนคลินิกเฟสจะเริ่มเสถียร แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนเฟสของเซอร์โคเนีย

คิวบิกเฟสจะมีโครงสร้างผลึกแบบฟลูออไรต์ (fluorite structure,  $CaF_2$ ) โดยที่อัญรูปอื่น ๆ จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ดังรูปที่ 2.2

Smith และ Cline [5] พบว่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส tetragonal-cubic transformation คือที่  $2285 \pm 50^\circ C$  อะตอม (atoms) จะเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของยูนิตเซลล์ (unit cell)



รูปที่ 2.2 อัญรูปของเซอร์โคเนีย

a.) ลูกบาศก์, b.) เตตระโกนอล และ c.) โมโนคลินิก ([4])

Wolten [6] พบว่า ในทางตรงกันข้าม ที่อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส monoclinic-tetragonal transformation โมโนคลีนิกเฟสจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเตตระโกนอล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  และจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนไม่พบในรูปของโมโนคลีนิก ที่อุณหภูมิประมาณ  $1180\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่ออุณหภูมิลดลงจะพบการเปลี่ยนอัญรูปของเซอร์โคเนียเป็นโมโนคลีนิก ณ อุณหภูมิ  $970\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเปลี่ยนเป็นโมโนคลีนิกทั้งหมดที่อุณหภูมิ  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  .ซึ่งจะมีช่วงอุณหภูมิในการจัดตัวของอะตอม (atomic readjustments) กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ cubic-tetragonal transformation

การเลือกวิธีการขึ้นรูปและลักษณะของผงที่ใช้เป็นสารตั้งต้นที่เหมาะสม จะทำให้ได้ชิ้นงานเซอร์โคเนียที่มีสมบัติตามต้องการ ดังนั้นการเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่าง 3 อัญรูปนี้ จะส่งผลให้การควบคุมเฟสต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ง่าย และทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างทางจุลภาคให้สอดคล้องกับสมบัติที่ต้องการได้

### 2.1.1 ลูกบาศก์

ลูกบาศก์เฟส เป็นโครงสร้างแบบฟลูออไรต์ เป็น face-centred cubic (fcc) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) โดยที่ประจุลบ (anion) (ออกซิเจนไอออน,  $\text{O}^{2-}$ ) จะอยู่ในตำแหน่งของ simple cubic packing และประจุบวก (cation) (เซอร์โคเนียมไอออน,  $\text{Zr}^{4+}$ ) จะอยู่ในตำแหน่งครึ่งช่องว่างระหว่างไอออน (half interstices) ในแลตทิซ (lattice) [7]

### 2.1.2 เตตระโกนอล

เตตระโกนอลเฟส เสถียรที่อุณหภูมิระหว่างประมาณ  $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $2370\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะผิดรูปไป (distort) จากโครงสร้างแบบฟลูออไรต์ ดังรูปที่ 2.2 (b.)

### 2.1.3 โมโนคลีนิก

โมโนคลีนิกเฟสจะเสถียรจากอุณหภูมิจากอุณหภูมิจากอุณหภูมิจากประมาณ  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  และจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็นเตตระโกนอลเฟสจนหมดที่อุณหภูมิประมาณ  $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$  บ่อยครั้งที่ใช้อ้างอิงกับแร่ที่ชื่อ "baddeleyite" แสดงดังรูปที่ 2.2 (c.)

Lattice parameter ของโมโนคลินิก เตตระโกนอล และลูกบาศก์เซอร์โคเนีย แสดงดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 lattice parameter ของ โมโนคลินิก เตตระโกนอล และลูกบาศก์เซอร์โคเนีย

อัญรูป	a (นาโนเมตร)	b (นาโนเมตร)	c (นาโนเมตร)	อ้างอิง
โมโนคลินิกเซอร์โคเนีย	0.5144	0.5133	0.5347	[8]
เตตระโกนอลเซอร์โคเนีย	0.50806	-	0.51837	[8]
ลูกบาศก์ ( $\text{Ca}_{0.15}\text{Zr}_{0.85}\text{O}_{1.85}$ )	0.5135	-	-	[9]

15 mol % CaO-doped  $\text{ZrO}_2$

## 2.2 CaO- $\text{ZrO}_2$ system

### 2.2.1 การสแตบิไลซ์เซอร์โคเนีย (Stabilization of Zirconia)

เซอร์โคเนียบริสุทธิ์ จะเกิด  $t \rightarrow m$  transformation เมื่ออุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิสูง ผ่านอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส (transformation temperature  $\sim 1170$  °C) จะทำให้ปริมาตรของยูนิทเซลล์เพิ่มขึ้น 3-5 % ด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตก (cracks) ของชิ้นงาน เนื่องจากมีความเค้นภายใน (internal stress) สูง การป้องกันการเกิดความเสียหายนี้ทำได้โดยนำเซอร์โคเนียมาทำการอัลลอยด์ (alloy) หรืออาจเรียกว่า การโด๊ป (dope) โดยการเติมสารประกอบออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) อิตเทรียมออกไซด์ ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) สแกนเดียมออกไซด์ ( $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ) อิตเทอบียมออกไซด์ ( $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ) ไททานเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และซีเซียมออกไซด์ ( $\text{CeO}_2$ ) เข้าไปใน solid solution ของเซอร์โคเนียในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้เกิด  $c \rightarrow t$  transformation เพียงเล็กน้อย ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึง ทำให้เกิดคงรูปลูกบาศก์เฟสที่อุณหภูมิจึงได้ [10, 11]

โดยทั่วไปจะนิยมใช้ แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อิตเทรียมออกไซด์ และ สแกนเดียมออกไซด์ เป็นตัวสแตบิไลซ์ซิงออกไซด์ (stabilizing oxides) โดยจะไปฟอร์มเป็น substitutional solid solution กับเซอร์โคเนีย สารประกอบออกไซด์นี้มีความสามารถในการละลายสูง (high solubility) และมีความสามารถในการฟอร์ม fluorite-type phases ทำให้เสถียร

ในช่วงส่วนผสม (composition) และอุณหภูมิที่กว้าง [12] ตัวผลเตปป์ไลซ์ซิงออกไซด์ที่เหมาะสมต้องสามารถที่จะไปฟอร์ม substitutional solid solution กับเซอร์โคเนียได้ ซึ่งจะต้องมีรัศมีของไอออนบวก (cation radius) ที่เหมาะสม ใกล้เคียงกับรัศมีของเซอร์โคเนียไอออน [10] ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณรัศมีของไอออนบวกของตัวผลเตปป์ไลซ์เซอร์

ตารางที่ 2.2 รัศมีของไอออนบวกของผลเตปป์ไลซ์ซิงออกไซด์ในเซอร์โคเนีย [13]

ไอออนบวก	รัศมี, $r$ (Å)	ความแตกต่างของรัศมีไอออนเปรียบเทียบกับเซอร์โคเนียไอออน (%)
Zr <sup>4+</sup>	0.79	
Ca <sup>2+</sup>	0.99	+ 25
Mg <sup>2+</sup>	0.66	- 16
Sc <sup>3+</sup>	0.73	- 8
Y <sup>3+</sup>	0.89	+ 13
Yb <sup>3+</sup>	0.86	+ 9
Ce <sup>4+</sup>	0.92	+ 16

ในปัจจุบันตัวผลเตปป์ไลซ์เซอร์ รู้จักกันดีในชื่อ “โดปเพนต์” (dopant) ที่เราใช้ในการผลเตปป์ไลซ์เซชันนั้น ต้องการใส่ในปริมาณที่น้อยที่สุด ในการทำให้เกิด fully stabilized cubic zirconia (FSZ), partially stabilized zirconia (PSZ) หรือ tetragonal zirconia polycrystal (TZP) ได้สมบูรณ์

## 2.2.2 Binary phase diagram of ZrO<sub>2</sub>-CaO system

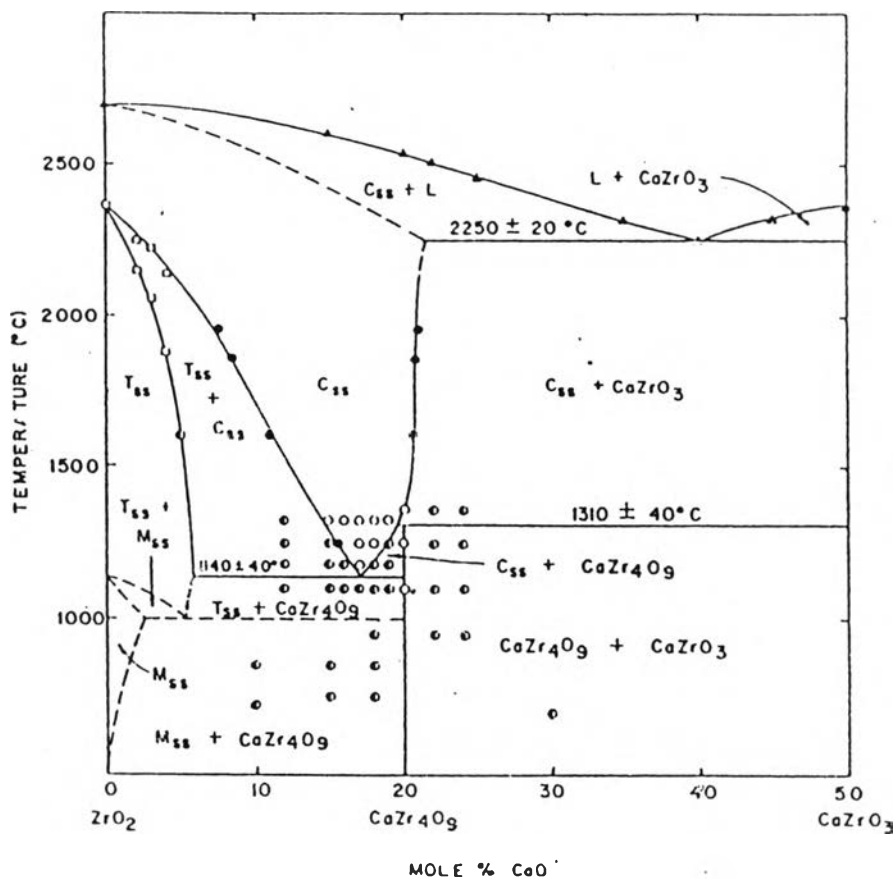
หลักพื้นฐานในการใช้งานของเซอร์โคเนียที่มีสมบัติแตกต่างกันไปนั้น ก็คือ ความสามารถในการคงรูปเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงให้คงรูปอยู่ที่อุณหภูมิต่ำได้ โดยการผลเตปป์ไลซ์เซอร์โคเนียด้วยสารประกอบออกไซด์ที่ไปฟอร์ม substitutional solid solutions เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อิตเทรียมออกไซด์ สแกนเดียมออกไซด์ ซีเซียมออกไซด์ และสาร

ประกอบออกไซด์ของแร่หายาก (rare earth oxides) ปริมาณของสารประกอบออกไซด์ที่ใช้ในการเคลือบไอซ์เซอร์โคเนีย ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ [14] ดังต่อไปนี้

1.) ขนาด (size factor) : ถ้าขนาดของไอออนบวกที่เราใส่เข้าไปมีขนาดต่างกับเซอร์โคเนียไอออน น้อยกว่า 15 % เราก็จะสามารถทำให้เกิดการ substitutional solid solution ตามต้องการได้ ในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดของไอออนต่างกันมากกว่า 15 % substitution จะเกิดได้จำกัด โดยปกติจะไม่เกิน 1 %

2.) วาเลนซี (valency factor) : ถ้าแคตไอออนที่ใส่เข้าไปมีวาเลนซีแตกต่างจากเซอร์โคเนียไอออน การเกิด substitution จะมีปริมาณจำกัด ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปไป เพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า (overall electrical neutrality)

แคลเซียมออกไซด์ คือหนึ่งในสารประกอบออกไซด์ทั่วไปที่นิยมใช้ในการฟอร์ม solid solution กับเซอร์โคเนีย จากเฟสไดอะแกรม (phase diagram) [15] รูปที่ 2.3 มี 3 ช่วงที่น่าสนใจ ช่วงปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 6 โดยโมล ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2000 °C จะพบเฟสของเตตระโกนอล ซึ่งเมื่อทำให้เย็นตัวจะเกิดเป็น 2 เฟส คือ เตตระโกนอลและโมโนคลินิก ถ้าทำให้เย็นตัวลงมาอีกจะเกิดเป็นเฟส โมโนคลินิกและ  $\text{CaZr}_4\text{O}_9$  ซึ่งการที่จะพบเฟส  $\text{CaZr}_4\text{O}_9$  นั้นได้นั้นต้องผ่าน periods of time หลาย ๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้น ช่วงที่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 6 โดยโมล ถึงประมาณ 17 โดยโมล ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,140 °C จะพบเฟสเตตระโกนอลและเฟส ลูกบาศก์ ซึ่ง 2 เฟส ที่พบนี้รู้จักกันในชื่อ partially stabilized zirconia ถ้าเราทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เตตระโกนอลเฟสจะเปลี่ยนรูปไปเป็นโมโนคลินิกเฟส ใน metastable matrix ของลูกบาศก์เฟส แต่ถ้าทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิระหว่าง 1,000-1,140 °C จะพบเตตระโกนอลเฟส ถ้าทำให้เป็นตัวต่ำกว่า 1,000 °C จะเกิด martensitic transformation ของเฟสเตตระโกนอล ไปเป็นเฟสโมโนคลินิก ในช่วงปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่พบเฟสลูกบาศก์ จะเรียกช่วงนี้ว่า fully stabilized zirconia ซึ่งจริง ๆ แล้วมันจะอยู่ในรูป metastable เกิดการเปลี่ยนเฟสอย่างช้า ๆ ที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ถ้าใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 800 °C ageing เป็นเวลานาน ๆ ก็อาจจะทำให้เฟสเกิดการเปลี่ยนไปได้



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของ ZrO<sub>2</sub>-CaO system

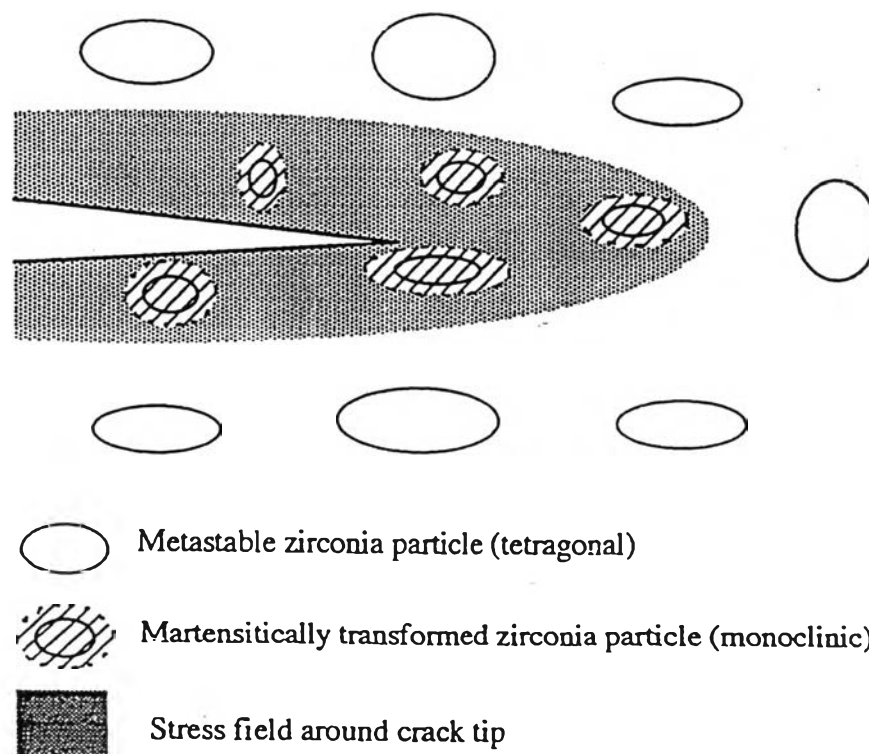
### 2.2.3 Partially stabilized zirconia (PSZ)

การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียบริสุทธิ์ ระหว่างเตตระโกนอลกับโมโนคลินิกเฟส เป็นการเปลี่ยนที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรประมาณร้อยละ 3-5 ในสมัยก่อนจะมองแต่ข้อด้อยในแง่ที่ว่าป็นตัวการทำให้ผลิตภัณฑ์แตกเสียหาย จึงหาทางป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น โดยการเติมสารบางชนิดเข้าไปจำนวนเล็กน้อย เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ หรือ อิตเทรียมออกไซด์ เพื่อกันไม่ให้โครงสร้างเปลี่ยนย้อนกลับเป็นโมโนคลินิกเฟส เมื่ออุณหภูมิลดลง ลูกบาศก์เฟสที่เกิดขึ้นก็ยังคงสภาพเป็นลูกบาศก์ได้ตลอดไป เราเรียกเซอร์โคเนียชนิดนี้ว่า สเตบิลไรซ์เซอร์โคเนีย

จากการศึกษาค้นคว้าต่อมาพบว่า ความเหนียว (toughness) และความต้านทานแรงเสียดทานของเนื้อเซอร์โคเนียจะมีค่าสูงเพิ่มขึ้นอีกมาก หากทำให้อยู่ในรูปของ "Partially Stabilized Zirconia" นั่นคือทำให้เนื้อเซอร์โคเนียเป็นเฟสลูกบาศก์แต่เพียงบางส่วนโดยไม่ให้

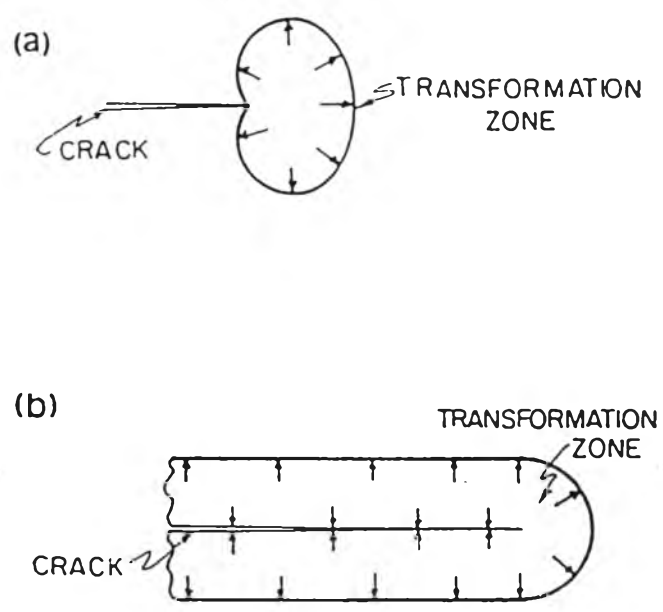
เป็นทั้งหมด เนื้อเซรามิกเหนียวแบบนี้จะประกอบด้วยผลึกเล็ก ๆ ของโมโนคลินิกหรือเตตระโกนอลในเนื้อ matrix ที่เป็นลูกบาศก์ และมีชื่อเรียกสั้น ๆ ว่า PSZ [16]

เดิมทีเนื้อ PSZ จะประกอบด้วยเฟสโมโนคลินิกและเฟสลูกบาศก์ แต่ต่อมาคณะวิจัยนำโดย R. Garvie แห่งสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ของประเทศออสเตรเลีย (CSIRO) ได้ชี้แนะให้เห็นเป็นครั้งแรกว่า เนื้อที่ประกอบด้วยเฟสเตตระโกนอลและเฟสลูกบาศก์ จะมีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่า โดยอธิบายว่า เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงเค้น (stress) ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแรงกระแทก (impact) แรงขัดสี (wear) หรือแรงจากการทุบตี (attract) เม็ดเฟสเตตระโกนอลซึ่งอยู่ในสภาพกึ่งคงตัว (metastable) จะรับเอาพลังงานจำนวนนี้เข้าไป โดยเอาเข้ามาใช้สำหรับทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างกลับเป็นโมโนคลินิกเฟส ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความคงตัว หรือเสถียรภาพมากกว่า การปรับเปลี่ยนโครงสร้างกลับนี้จะเกิดเฉพาะบริเวณที่ถูกแรงกระทำเท่านั้น และมีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเกิดขึ้นด้วย มีผลทำให้เกิดขึ้น หรือบริเวณแรงอัด (compression) ขึ้นรอบ ๆ ผลึก เมื่อมีรอยแตก แตกผ่านเนื้อส่วนนี้ก็จะแตกผ่านด้วยความยากยิ่งขึ้น นั่นก็หมายความว่าวัสดุสามารถต้านทานการหักได้ดียิ่งขึ้น จากการทำกำลังของวัสดุ และสมบัติความต้านทานการหัก มีค่าสูงเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนโครงสร้างนี้เอง จึงมีชื่อเรียกวัดุดนี้ชื่อหนึ่งว่า "Transformation Toughened Zirconia" ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 Stress-induced transformation of metastable  $ZrO_2$  particles in the elastic stress field of a propagating crack [17]





รูปที่ 2.5 transformation zones of (a) initial stage and (b) process zone after the initial stage [18]

ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นค่ากำลังของวัสดุ และความต้านทานการหักของเนื้อเซอร์โคเนียชนิดที่ประกอบด้วยเตตระโกนอลเฟสผสมกับลูกบาศก์เฟส มีค่าสูงกว่าชนิดที่ประกอบด้วยโมโนคลินิกเฟสผสมกับลูกบาศก์เฟส และชนิดลูกบาศก์เฟสล้วน ๆ ประมาณเกือบ 3 เท่าตัว

ตารางที่ 2.3 ค่ากำลังของวัสดุและความต้านทานการหักของเนื้อเซอร์โคเนียชนิดต่าง ๆ [16]

ชนิด	กำลังของวัสดุ แบบหักตามขวาง (MPa)	ความต้านทาน การหัก (MN/m <sup>3/2</sup> )
เตตระโกนอล ผสมกับ ลูกบาศก์เซอร์โคเนีย	650	7.1
โมโนคลินิก ผสมกับ ลูกบาศก์เซอร์โคเนีย	250	3.7
ลูกบาศก์เซอร์โคเนีย	245	2.8

## 2.2.4 การใช้งานของเซอร์โคเนียในอุตสาหกรรมเซรามิกส์

### 2.2.4.1 Unstabilized Zirconia

- ZrO<sub>2</sub> grain
- Granules

เซอร์โคเนียเกรน (zirconia grain) ใช้ในพวก kiln furniture เช่น สำหรับ กาวเผา silicon carbide grinding discs ถ้าเปรียบเทียบกับ corundum แล้ว เซอร์โคเนียจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่า เพราะมี inertness และ roundness สูง

Unstabilized และ presintered granules จะใช้ทำ ZrO<sub>2</sub> crucibles และ ZrO<sub>2</sub> pipes ในการใช้งานด้าน inductive heating และการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและ chemical purity ZrO<sub>2</sub> pipes ที่ใช้ในการ inductive heating จะใช้มากในการทำ glass fiber

### 2.2.4.2 Partially Stabilized Zirconia

- Dispersion and Grinding Media

ใช้ในงานด้านการขัดสีมาก เพราะว่า จะมีความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) ที่สูง มีแนวโน้มในการถูกขัดสีที่ต่ำ มีการปนเปื้อน (contamination) น้อยในขณะทำการบดหรือใช้เป็น dispersion media และมีความทนทานต่อสารเคมี (chemical resistance) ใน dispersion agents ได้ดี

ZrO<sub>2</sub> dispersion และ grinding media ใช้ในการเตรียมวัสดุพิเศษที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ปราศจากการปนเปื้อนของเซอร์โคเนีย เช่น ใช้ในการเตรียมเคลือบ staining agents hifi/video tapes และงานที่ต้องการการปนเปื้อนที่ต่ำ

ในการเปรียบเทียบการบดโดยใช้ลูกบดเซอร์โคเนียกับลูกบดอะลูมินา ที่มีขนาดเท่ากัน ในการบดแร่เซอร์คอนนั้น จะได้ขนาดของอนุภาคที่บดด้วยลูกบดเซอร์โคเนีย มีขนาดเล็กกว่าการบดด้วยลูกบดอะลูมินา อัตราส่วนการถูกขัดสี (ratio of abrasion) ของลูกบด ถ้าวัดเป็นน้ำหนัก จะได้เท่ากับ 15 : 10 (ลูกบดอะลูมินา : ลูกบดเซอร์โคเนีย) ถ้าใช้ลูกบด 1000 กิโลกรัม จะมีน้ำหนักที่สูญเสีย (weight loss) ของลูกบดเซอร์โคเนีย 10 กรัม และลูกบดอะลูมินา 120 กรัม สรุปก็คือ การใช้ลูกบดเซอร์โคเนียจะใช้เวลาในการบด (grinding times) ที่สั้นกว่าและมี

การสึกหรอ (wear) น้อยกว่า ลูกบดอลูมินา ในการใช้งานด้าน grinding media และ lining ของหม้อบด

ในการใช้งานด้านการบด ปกติจะใช้ลูกบดเซอร์โคเนียขนาดอยู่ในช่วง 0.8-2 มิลลิเมตร ส่วนลูกบดที่เป็นทรงกระบอก (grinding cylinders) จะอยู่ในช่วง 10-15 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม อาจจะมีขนาดถึง 36 mm. สำหรับการใช้งาน

#### - Kiln Furniture

Kiln furniture มีส่วนประกอบหลักคือ เซอร์โคเนียที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องการ inertness ระหว่าง kiln furniture กับชิ้นงานในระหว่างการเผา ซึ่งเซอร์โคเนียที่ถูกกลดบิลด์ด้วย แคลเซียมออกไซด์ หรือ อิตเทรียมออกไซด์ เหมาะกับการใช้งานนี้ เพราะมี chemical inertness

Setter plates อาจมีการกระจายขนาดเม็ดสาร (grain size distribution) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 1 มิลลิเมตร ทนต่อความร้อน มี mechanical stability และ flatness ที่ดี โดยจะใช้ small plates ขนาดประมาณ 10 x 6 x 0.5 ตารางเซนติเมตร มาเรียงต่อกันเป็นชั้นแบบ cassette system ใช้มากในงานอุตสาหกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์

#### - Eccentric Discs for Mills

การใช้งานของเซอร์โคเนียในด้านการบดละเอียดมาก ๆ คือ eccentric discs แมกนีเซียมออกไซด์เซอร์โคเนีย จะมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง จึงได้นำเอาข้อดีนี้มาใช้ทำเป็น eccentric discs และเมื่อใส่ลูกบดเซอร์โคเนียเข้าไปอีกก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการบดเพิ่มขึ้น Eccentric discs จะทำให้ลูกบดเคลื่อนที่ไปพร้อมกับวัตถุบดที่ใส่ลงไป ในการบดแบบนี้จะเหมาะในงานที่ต้องการขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาก ๆ

ถ้าเปรียบเทียบ eccentric discs ที่ทำจากเซอร์โคเนียกับอลูมินา เซอร์โคเนียจะมีข้อดีก็คือ discs จะเกิดการ spalling น้อยกว่า และเนื่องจากมี metastable ของ tetragonal/cubic phases ทำให้มี ductile ที่ดีกว่าอลูมินา

### - Tubes with Inductive Heating

อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานเป็น heating elements นั้นจะดูที่ความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation resistance) ใน metallic elements สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 1300 °C (Kantal) และ super-Kantal ใช้งานได้ถึง 1600 °C

สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนียสามารถนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C และสามารถใช้สำหรับทำ electrical resistance heating การที่จะนำเอา metallic conductor มาใช้กับ zirconia นั้นทำได้ยาก แต่ต่อมาก็ได้มีการใช้ zirconia tube กับ induction coil

### - Kiln Linings

แคลเซียมสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย จะใช้เป็นพิเศษสำหรับการหลอม quartz ในอุตสาหกรรมการทำ glass pipe และ glass fiber Tongue และ groove bricks จะมีรูปร่างอยู่หลาย ๆ แบบ และจะมีหน้าที่ป้องกันการ radiation ของ flux เพื่อการประหยัดพลังงานที่ใช้ เซอร์โคเนียจะ wetted กับ siliceous และ metallic melts เพียงเล็กน้อยมาก ๆ ความสามารถในการละลายของเซอร์โคเนียในซิลิคอนออกไซด์ (silicon oxide) จะต่ำมาก และ chemical attack บน refractory material เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น ๆ ก็ต่ำกว่า

การใช้งานอื่น ๆ ของ zirconia linings จะใช้งานในเตาอุณหภูมิสูงสำหรับการเผาในลักษณะพิเศษ และที่เป็น high-performance ceramics รูปร่างของ lining มีอยู่หลายแบบขึ้นกับลักษณะการใช้งานและราคา ตัวอย่างเช่น burner blocks สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะมีรูปร่างตามความต้องการเพื่อกัน flame spread

ผลิตภัณฑ์เนื้อ PSZ สามารถปรับแต่งให้มีสมบัติเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของการใช้งานได้ ตัวอย่างการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ได้ผลดี อาทิเช่น

- ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เช่น tappets, valve guides เครื่องยนต์ที่ทำด้วย PSZ ไม่จำเป็นต้องมีเครื่องระบายความร้อน ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพสูง และออกแบบเครื่องยนต์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

- หัวดาย (die) สำหรับรีดโลหะ
- แม่พิมพ์สำหรับหล่อหรืออัดโลหะ หรือที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติก
- หัวฉีด (nozzles)
- แปรง

### 2.2.4.3 Fully Stabilized Zirconia

#### - Oxygen sensors

สารประกอบออกไซด์ valences ต่ำ ที่เติมเข้าไปใน zirconia lattice จะทำให้เกิด oxygen vacancies ขึ้นใน host lattice ซึ่งขึ้นกับปริมาณของสเตบิลไลเซอร์ ที่เติมเข้าไป การเกิด oxygen ion conductivity สามารถใช้เป็นตัววัดออกซิเจน (รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.5) นิยมใช้กันอย่างมากในอุตสาหกรรมเซรามิก ซึ่งถ้าในเตาเผาเซรามิก มีปริมาณออกซิเจนสูงไป จะเกิดการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงที่มากเกินไป จะทำให้เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น แต่ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำมาก ๆ หรือเกิด reducing combustion process จะให้ผลของผลิตภัณฑ์ที่ถูกเผามีคุณภาพตรงกันข้ามกัน และอาจทำให้ lining สึกหรือก่อนเวลาอันควร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการบรรยากาศในการเผาเซรามิกแต่ละชนิด

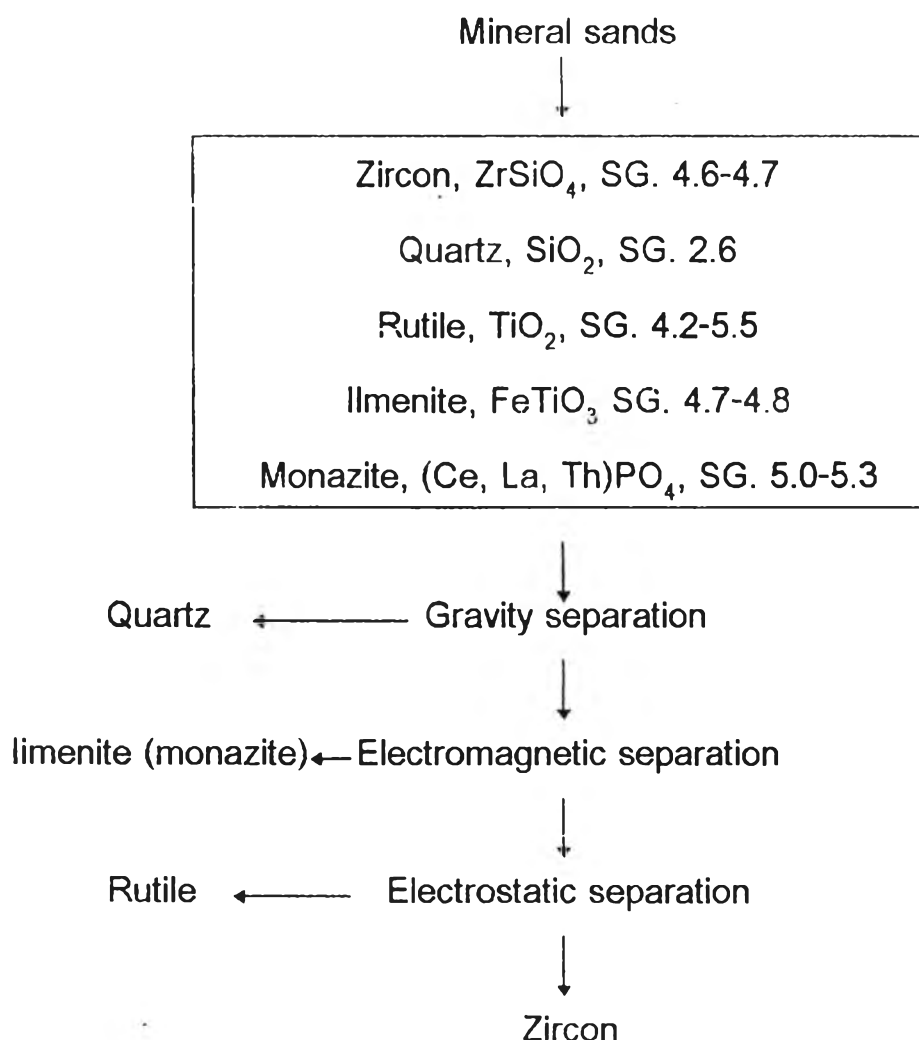
#### - Lab Equipment / Crucibles

Fully stabilized zirconia materials จะใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ด้วย อย่างไรก็ตาม จะใช้ในการใช้งานที่พิเศษ เช่น อุปกรณ์ในห้องทดลอง ยกตัวอย่างเช่น porous crucibles ที่ทำจาก full CaO stabilization ซึ่งจะใช้ในการหลอม noble metals ที่อุณหภูมิสูง

## 2.3 กระบวนการผลิตเซอร์โคเนียจากแร่เซอร์คอน

### 2.3.1 การแยกเซอร์คอนจากทรายตามธรรมชาติ

แร่หลัก 2 ชนิดที่มีเซอร์โคเนียอยู่มากก็คือ baddeleyite ( $ZrO_2$ ) และเซอร์คอน ซึ่งแร่ baddeleyite จะพบมากในอัฟริกาใต้ (South Africa) ส่วนเซอร์คอนจะพบทั่วไปตามชายทะเลใน ทุก ๆ ส่วนของโลก ในประเทศไทยจะพบมากตามชายทะเลทางภาคใต้เป็นหลัก ซึ่งจะมีแร่โลหะหนัก (heavy minerals) ปะปนอยู่ เช่น อิลมาไนต์ (ilmenite,  $FeTiO_3$ ), รูไทล์ (rutile,  $TiO_2$ ) และ โมนาไซต์ (monazite,  $(Ce,La,Th)PO_4$ ) สามารถแยกแร่โลหะหนักออกจากแร่เซอร์คอนได้โดยการใช้ wet-gravity concentration และตามด้วย dry-separation techniques โดยใช้ magnetic และ eletrostatic process ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแยกเซอร์คอนจากทรายตามธรรมชาติ

แหล่งการผลิตเซอร์คอนหลักจะอยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย แอฟริกาใต้ สหรัฐอเมริกา รัสเซีย และอินเดีย ซึ่งปริมาณการผลิตเซอร์โคเนียในโลก จะมีประมาณ 800,000 เมตริกตัน (metric tons) ต่อปี

### 2.3.2 การสกัดเซอร์โคเนียจากเซอร์คอน [19]

เซอร์คอนจะมีความเสถียรเชิงเคมี (chemically stable) มาก จึงต้องคำนึงถึงพลังงาน (energy) ที่ใช้ในการ ทำลายพันธะ (break bonds) ในการสกัดเซอร์โคเนียจากเซอร์คอน

- เซอร์คอนสามารถแตกตัว เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxides, NaOH) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์เซอร์โคเนต (sodium zirconate, Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>) และไฮดรอกไซด์ซิลิเกต (sodium silicate, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)



ไฮดรอกไซด์ซิลิเกตสามารถกำจัดโดยการ leaching ด้วยน้ำ ซึ่งในขณะเดียวกันก็จะเกิดการไฮโดรไลซ์ (hydrolyzes) ของไฮดรอกไซด์เซอร์โคเนต ไปเป็นไฮดรอกไซด์เซอร์โคเนีย (hydrate zirconia) หลังจากนั้นจึงนำมาเผาแคลไซน์ (calcine) เพื่อขจัดมลทินพวกออกไซด์ (oxide impurities) หรืออาจนำไปทำให้บริสุทธิ์ (purified) ขึ้นต่อไป โดยการใช้อcid leaching และนำไปทำการตกตะกอนร่วม (coprecipitation) ในที่นี้อาจใช้ไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต (sodium carbonate) แทนไฮดรอกไซด์เซอร์โคเนีย (sodium hydroxide) ได้ แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต้องสูงขึ้นไปประมาณ 1000 °C

- เซอร์คอน ผสมกับ คาร์บอนและแก๊สคลอรีน สามารถเกิด chlorinated ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 °C เกิดเป็นเซอร์โคเนียมเตตระคลอไรด์ (zirconium tetrachloride, ZrCl<sub>4</sub>) และซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride, SiCl<sub>4</sub>)



เนื่องจากเซอร์โคเนียมเตตระคลอไรด์ สามารถควบแน่น (condense) ที่ 150-180 °C ขณะที่ ซิลิคอนเตตระคลอไรด์ จะควบแน่น (condense) ที่ -10 °C ทำให้สามารถแยกเซอร์โคเนียมเตตระคลอไรด์ออกมาได้โดยง่าย เซอร์โคเนียมเตตระคลอไรด์สามารถนำมาทำ partially hydrolyzed เกิดเป็นเซอร์โคเนียออกซิคลอไรด์ (zirconium oxychloride, ZrOCl<sub>2</sub>) ซึ่งสามารถนำมาเผาแคลไซน์เป็นเซอร์โคเนีย หรือนำมาละลายในน้ำและตกตะกอน (reprecipitated) เป็น hydrous zirconia ด้วยการเติมเบส (base) ได้

- เซอร์คอน เมื่อได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่า 1750 °C (ใน arc furnace plasma furnace หรือ advanced electric reactor) จะสลายตัวเป็นสารประกอบออกไซด์ คือ เซอร์โคเนีย และ ซิลิกา (silica, SiO<sub>2</sub>)



และ quenching เพื่อป้องกันสารประกอบออกไซด์ รวมตัวกันเป็นเซอร์คอน หลังจากนั้นนำมา treat ด้วยกรด เพื่อละลายเซอร์โคเนีย หรือ treat ด้วยด่าง (caustic) เพื่อละลายซิลิกา

หลังจากทำการสกัดเซอร์คอน (extraction zircon) แล้ว เซอร์โคเนียที่ได้มักจะอยู่ในรูปของของเหลว (solution) นำมาทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น (ส่วนมากจะทำโดยการตกผลึก (crystallization)) หลังจากนั้นจึงมาทำการ solidified วิธีการเตรียมพาร์เตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำ consolidation ให้ได้ fully dense body มีหลายวิธี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วต้องการพาร์เตอร์ที่ละเอียดมีพื้นผิวมาก เป็นทรงกลม มีความบริสุทธิ์เชิงเคมี

- สำหรับวิธีโซล-เจล (sol-gel) การเตรียมโซล (sol) (well dispersed fine colloid) มีหลายวิธี เช่น โดยตกตะกอนเป็นพันธะแบบเปปไทซิง (peptizing a precipitate) การกระจายตัวแบบคอลลอยด์ (dispersing a colloid) หรือไฮโดรไลซิงของอัลคอกไซด์ (hydrolyzing an alkoxide) หลังจากนั้นโซลจะกลายเป็นเจล ซึ่งส่วนมากจะเป็นชนิด rigid พอร์มเป็นโครงสร้างแบบร่างแห (three-dimensional network) โดยการปรับ pH อุณหภูมิ หรือปริมาณน้ำ (water content) จากนั้นนำเจลที่ได้มา ทำการเผาแคลไซน์ เพื่อให้ได้พาร์เตอร์ตามต้องการ

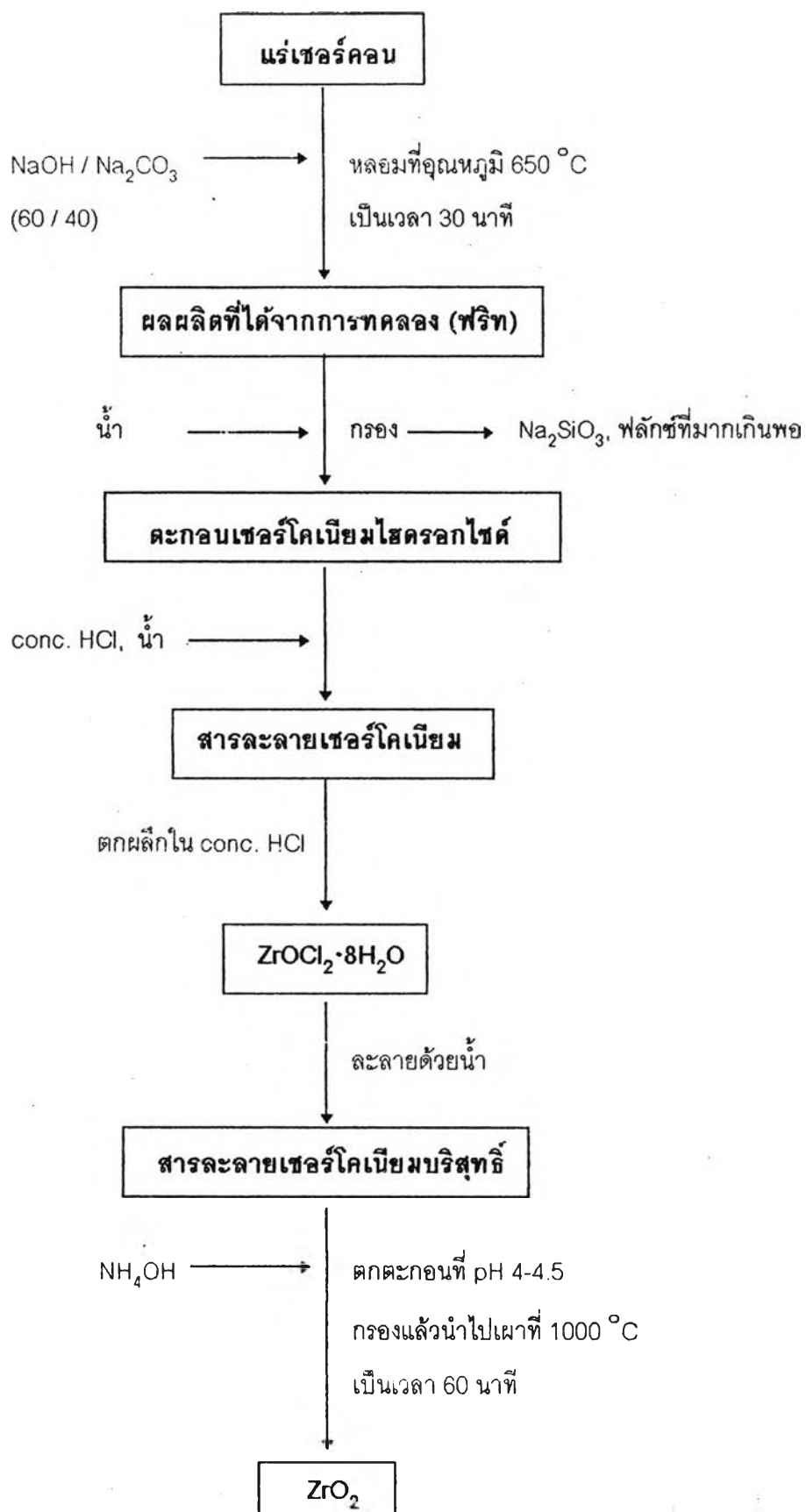
- วิธี flame-evaporation หรือ spray-hydrolysis technique ทำโดยการพ่นสารละลายเซอร์โคเนีย (spraying a zirconia solution) เข้าไปใน hot zone จากนั้น solution จะ decomposes และ evaporates ได้เป็นอนุภาคของเซอร์โคเนียที่เป็นทรงกลม

- วิธีตกตะกอน (precipitation) โดยการควบคุมการตกตะกอน ด้วยการปรับ pH ส่วนผสมของอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte composition) และความเข้มข้น (concentration) การผันแปร (vary) ตัว reactant ที่เติมเข้าไปหรืออุณหภูมิ เพื่อให้ได้พาร์เตอร์ตามต้องการ

หลังจากขั้นตอนการเตรียมผงแล้ว อาจนำผงที่ได้มาทำการอบแห้ง (dry) เผาแคลไซน์ (calcine) บดละเอียด (mill) และ/หรืออบแห้งแบบพ่น (spray-dried) ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมผง และลักษณะผงที่ต้องการ

ในประเทศไทยได้มีการทำการวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมเซอร์โคเนียบริสุทธิ์ [2, 3, 20] ซึ่งในปี 2533 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้วิจัยและพัฒนา โครงการผลิตเซอร์โคเนียบริสุทธิ์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม ด้วยทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สามารถเตรียมเซอร์โคเนียจากแร่เซอร์คอน ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 98 โดยวิธีการหลอมแร่เซอร์คอนกับฟลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7





รูปที่ 2.7 แผนผังอย่างง่ายในการเตรียมสารประกอบ เซอร์โคเนียด้วยวิธีการหลอมแร่กับฟลักซ์ [3]

## 2.4 กระบวนการผลิตแคลเซียมดีบุกเซอร์โคเนีย

ลักษณะของผงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการขึ้นรูปทางเซรามิกส์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติตามต้องการ Somiya [21] ได้แสดงคุณสมบัติของผงที่ต้องการในอุดมคติเพื่อนำไปใช้งานมีดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดของอนุภาคละเอียดน้อยกว่า 1 ไมครอน
- 2) การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีช่วงที่แคบ
- 3) อนุภาคเกิด agglomeration น้อย
- 4) homogeneity
- 5) controllable composition and purity
- 6) มีโครงสร้างจุลภาคตามต้องการ

การเตรียมแคลเซียมดีบุกเซอร์โคเนีย ในอดีตเตรียมได้จากการนำผงเซอร์โคเนียมาทำการกวนผสมกับแคลเซียมออกไซด์ จากนั้นนำมาทำการเผาที่อุณหภูมิสูง วิธีนี้จะต้องใช้อุณหภูมิที่สูง ประมาณ 1700 °C ในการเตรียมและการเผาผนึก และจะได้ผงที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneity) เนื่องจากเซอร์โคเนียจะมีความเฉื่อยทางเคมี (chemical inertness) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการทำปฏิกิริยา

ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและพัฒนาการเตรียมสดีบุกเซอร์โคเนียอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมผงและการเผาผนึกต่ำลง โดยใช้ active powder เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา การเตรียมแคลเซียมดีบุกเซอร์โคเนียโดยวิธีการเคมีนี้ได้มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาซึ่งมีวิธีการต่าง ๆ กัน เช่น วิธี mixed oxide [22, 23] , วิธี hydrothermal [24, 25] , วิธีการตกตะกอนร่วม [26-29] เป็นต้น

## 2.5 Ionic conductivity

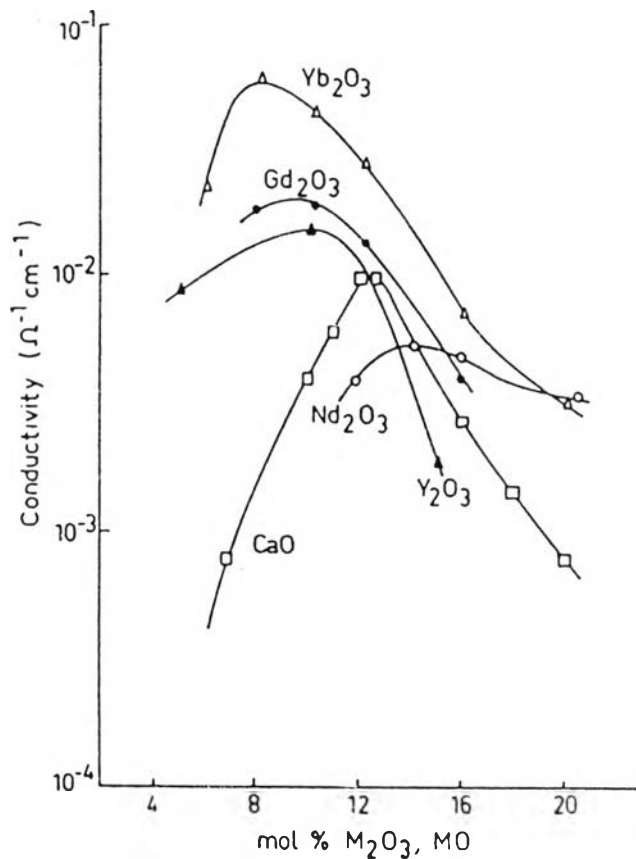
### 2.5.1 Ionic conductivity of calcium doped zirconia ceramics

สารประกอบออกไซด์ เช่น แคลเซียมออกไซด์ อิตเทรียมออกไซด์ หรือสแกนเดียมออกไซด์ ที่เติมเข้าไปในการเตรียมสดีบุกเซอร์โคเนียให้อยู่ในรูปโครงสร้างคิวบิกเฟส จะทำให้เกิด oxygen ion vacancies ขึ้น เป็นผลให้ oxygen ion diffusion coefficient มีค่าสูง [30] มีค่า ionic conductivity ที่ดี โดยที่จะมีค่า electronic conductivity ที่ต่ำ มีค่า ionic conductor ที่ดี (transport number,  $t_+ > 0.99$ ) ในช่วง oxygen pressure ที่กว้าง [30, 31] สมบัติต่าง ๆ ที่กล่าว

มานี้สามารถนำมาประยุกต์ในงานด้านตัววัดออกซิเจน เช่น เครื่องวัดปริมาณออกซิเจน สำหรับกระบวนการหลอมโลหะ หรือในการควบคุมการเผาไหม้ ตัวปรับความดันอากาศในปั๊มออกซิเจน การควบคุมอัตราของเชื้อเพลิงต่อปริมาณออกซิเจนในตัวกำเนิดไฟฟ้า

การใช้งานทางด้านตัววัดออกซิเจนนี้ จะต้องมีสมบัติหลักที่สำคัญในการเตรียมแผ่นอิเล็กโทรไลต์ (solid electrolyte membranes) ดังนี้คือ ต้องมีค่า ionic conductivity ที่ดี ( $> 10^2 \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  ในช่วงอุณหภูมิของการใช้งาน) และต้องมีสมบัติที่โมเลกุลออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านได้ (impermeable) เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกซิเจนผ่าน membrane โดยตรง (density  $> 92 \%$ ) อีกทั้งระยะเวลาการใช้งาน ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลัน (thermal shock) และความทนทานต่อสารเคมีได้ดี เช่น การกัดกร่อน เป็นต้น

รูปที่ 2.8 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสเตบิลิเซอร์โคเนียที่โดปด้วยสารประกอบออกไซด์ต่าง ๆ [32]



รูปที่ 2.8 ค่าการนำไฟฟ้าของสเตบิลิเซอร์โคเนียที่โดปด้วยสารประกอบออกไซด์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 1080 K

## 2.5.2 oxygen sensor

คิวบิกสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย สามารถนำไปใช้งานในการควบคุมปริมาณออกซิเจนของแก๊ส และในสารละลายของโลหะหลอม (molten metal) [33-37] ในการใช้งานนี้จะมีขั้วไฟฟ้า (electrodes) เป็นแผงแพลทินัมเส้นเล็ก ๆ (platinum gauze) ซึ่งจะอัดลงไปบนผิวของชิ้นงานคิวบิกสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนียก่อนที่จะนำไปเผา แผงแพลทินัมเส้นเล็ก ๆ นี้ จะมีลวดแพลทินัม (platinum wires) เชื่อมต่อเข้ากับ high-impedance voltmeter [34, 36] แสดงดังรูปที่ 2.9 แพลทินัมจะเป็นตัวเร่งการ dissociation และ recombination ของโมเลกุลออกซิเจน ดังนั้นไอออนออกซิเจน จะสามารถเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าข้างหนึ่งและเปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลออกซิเจนที่ขั้วไฟฟ้าอีกข้างหนึ่ง ดังสมการ

$$\Delta G^\circ_T = -ZFE$$

$$\Delta G^\circ_T = -RT \cdot \ln(a_1 / a_2)$$

ดังนั้น ถ้าความดันย่อยของออกซิเจน ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง คือ  $p_1$  และ  $p_2$  ตามลำดับ จาก Nernst equation จะได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, e.m.f.) คือ

$$E = (RT / 4F) \cdot \ln(p_1 / p_2)$$

$$\Delta G^\circ_T = \text{ความแตกต่างของค่าคงที่เสรีมาตรฐานที่อุณหภูมิ } T \text{ ใด ๆ ใน}$$

cell reaction

(standard free-energy of cell reaction at temperature)

$$Z = \text{จำนวนประจุของไอออน (} Z = 4 \text{ สำหรับออกซิเจน)}$$

$$F = \text{ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday constant)}$$

$$= 9.649 \times 10^4 \text{ C.mol}^{-1}$$

$$E = \text{ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า}$$

$$R = \text{ค่าคงที่ของแก๊ส} = 8.314 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

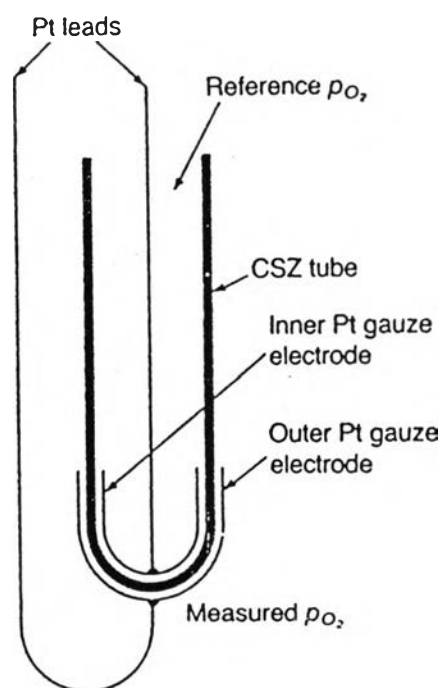
$a_1, a_2$  = activity 1 และ activity 2 ตามลำดับ

$p_1$  = ความดันย่อยของออกซิเจนในแก๊สตัวอย่าง  
(partial pressure of oxygen in sample gas)

$p_2$  = ความดันย่อยของออกซิเจนที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง  
(partial pressure of oxygen in a reference)

ในการใช้งาน ส่วนมากอากาศ (air) ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง (reference material) จะ

ใช้  $p_2 = 0.209 \text{ atm}$  หรือ  $21.2 \text{ kPa}$ .



รูปที่ 2.9 Zirconia oxygen concentration cell [34]

คิวบิกสเตปิลไลท์เซอร์โคเนียที่ใช้ทำตัววัดออกซิเจนจะสามารถใช้เป็น ตัววัด ปริมาณแก๊สในเครื่องยนต์ (monitor automobile exhaust gas emissions) ดังนั้น สามารถจะ ควบคุมอัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ (fuel-to-air ratio) ให้อยู่ในระดับที่ได้ผลดีที่สุด [34, 36, 37] ส่วนปลายปิด (closed end) นำเข้าไปในส่วนที่มีไอเสียร้อน (hot exhaust) และจะถูกทำให้ อุณหภูมิสูงขึ้น จนตัวเซ็นเซอร์ (sensor) ร้อนถึงอุณหภูมิที่สูงพอจะทำให้มันมีความสามารถในการ นำไฟฟ้าเพียงพอ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จะวัดได้โดยเครื่อง high-impedance instrument

ในลักษณะที่คล้ายกันอาจทำการตรวจปริมาณออกซิเจนของเหล็กกล้า (steels) โดยการจุ่มเซอร์โคเนียเซ็นเซอร์ ( $ZrO_2$  sensor) โดยตรงลงใน molten metal ซึ่งวิธีนี้ต้องคำนึงถึง ความต้านทานต่อ thermal shock เป็นสำคัญ การควบคุมปริมาณออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นใน หลาย ๆ การใช้งานทางด้านโลหะการ เช่น gas carburizing และ bright annealing ของเหล็ก- กล้าไร้สนิม (stainless steel)