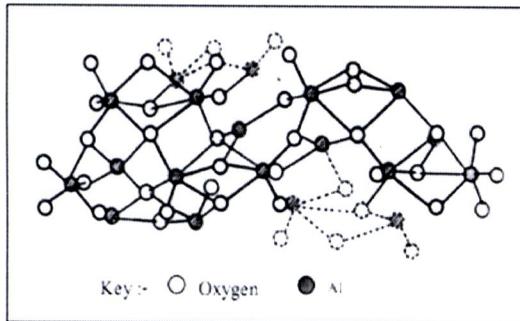


บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อะลูมินา

อะลูมินา (Alumina) มีชื่อทางเคมีคือ Aluminium Oxide มีสูตรทางเคมี เป็น Al_2O_3 จัดเป็น ออกไซด์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ยุคค้ำบรรพ์จนกระทั่งถึงปัจจุบันและยังคงถูกพัฒนานำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคต อะลูมินาบริสุทธิ์มีความถ่วงจำเพาะ 3.69 จุดหลอมเหลว $2030^{\circ}C$ ความแข็ง (Mohs Scale) เท่ากับ 9 อะลูมินาในธรรมชาติจัดเป็นแร่ธาตุที่พบในรูปของ Corundum (Al_2O_3) Diaspore ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) Gibbsite ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) และ Bauxite ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) โดยแร่ Corundum ที่พบจะเป็นรัตนชาติ เช่น ทับทิม (Ruby) ไพลิน (Sapphire) บุษราคัม (Yellow Sapphire) เป็นรูปแบบของ Corundum ที่มีมลทิน ในขณะที่ Corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี อะลูมินาบริสุทธิ์และ Hydrate อะลูมินา สามารถสกัดได้จาก แร่ Bauxite และดินลูกรังโดยวิธีของ Bayer (Bayer Process) คือนำแรมมาบดแล้วหลอมด้วย โซดาไฟ (Caustic Soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผาอะลูมินาจะพบในรูปอัลฟา (α) แกมมา (γ) และเบต้า (β) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ อัลฟาอะลูมินาและแกมมา อะลูมินาในอุณหภูมิที่ไม่เกิน $500^{\circ}C$ อะลูมินาจะอยู่ในรูปแกมมา หากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง $1150-1200^{\circ}C$ จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของอัลฟา แต่เบต้าอะลูมินาจะอยู่ในรูปของ สารประกอบโซเดียมคือ Sodium Aluminate ($Na_2O \cdot 11Al_2O_3$) (สุจินต์ พราวพันธุ์, 2545) ซึ่งอะลูมินาที่มีความเสถียรมากที่สุดอยู่ในรูปอัลฟาอะลูมินา ($\alpha-Al_2O_3$) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเฮกซาโกนอล (Hexagonal) โดยมีออกซิเจนเรียงตัวกันแบบเฮกซาโกนอล และมี อะลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่ในช่องออกตะฮีดรอล 2 ใน 3 ส่วนของช่องทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



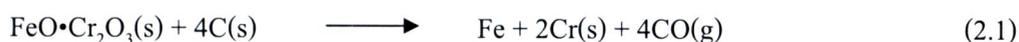
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของอะลูมินา (W.E. Worrall, 1986)

เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีค่าความแข็งสูง มีความหนาแน่นสูง มีความต้านทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนสูง ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (Abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมเซรามิก และอื่น ๆ ซึ่งแนวโน้มในการนำอะลูมินาไปใช้งานก็ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะ อุตสาหกรรมเซรามิกสมัยใหม่ สามารถนำอะลูมินาที่ได้จากการสังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภท เช่น อุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า เครื่องมือตัดแต่งอุปกรณ์ทางการแพทย์ อวัยวะเทียม เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้น โดยอะลูมินาที่นำมาใช้นั้นจะมีชนิดทั้งที่เป็นผง เป็นผลึกเดี่ยว ๆ เป็นฟิล์มบาง ๆ เป็นเส้นใยและที่เป็นรูพรุน ทั้งนี้อะลูมินาที่จะนำมาใช้นั้นต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีความละเอียดมากเพราะสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของอะลูมินาสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการกำจัดมลทินต่าง ๆ ออกไป เช่น ซิลิกาที่ปนเปื้อนจะมีผลต่อการควบคุม Microstructure มีผลต่ออัตราการสึกกร่อนของอะลูมินารวมทั้งมีผลต่อการเผาผนึก (Sintering) และแคลเซียมที่ปนเปื้อนก็มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมินาลดลง

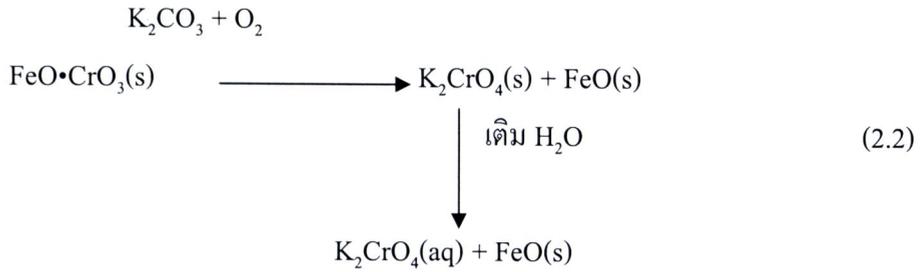
2.2 โครเมียม

โครเมียม หรือ โครเมียมออกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ มีสูตรทางเคมีคือ Cr_2O_3 มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซาโกนอล (Hexagonal) มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง ประมาณ 5.22 g/cm^3 จุดหลอมเหลวประมาณ 2330°C โครเมียมนี้เกิดจากแร่โครไมต์ซึ่งมีสูตรเคมีว่า $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ โดยในเนื้อสินแร่จะพบเหล็กออกไซด์ (FeO) อยู่ประมาณ 32% และโครเมียม (Cr_2O_3) อยู่ประมาณ 68% มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเล็กน้อย ส่วนมากที่พบจะมีสีดำ สีเทา หรือสีดำน้ำตาล

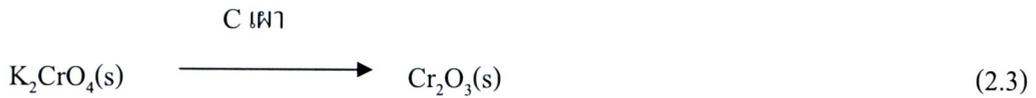
- ซึ่งการสังเคราะห์โครเมียมนี้สามารถทำได้โดยเริ่มจากการเผาแร่โครไมต์กับคาร์บอน



Fe และ Cr ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปโลหะเจือ โดยมี $\text{Fe} : \text{Cr} = 1 : 2$ ถ้าต้องการโครเมียมบริสุทธิ์สามารถเตรียมได้โดยเผาแร่โครไมต์กับ K_2CO_3 ในอากาศจะได้ K_2CrO_4 ซึ่งละลายน้ำได้จึงสามารถแยกออกจาก FeO ได้

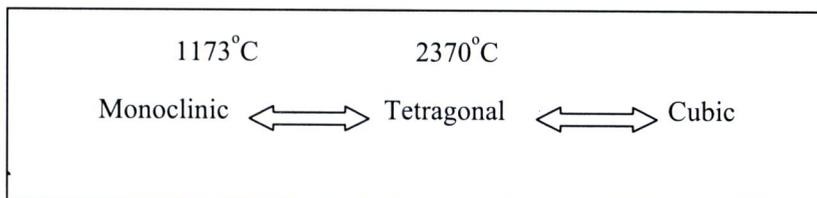


กรอง K_2CrO_4 ออกจาก FeO ระเหยน้ำออกจะได้ $\text{K}_2\text{CrO}_4(\text{s})$ จากนั้นนำมาเผาที่คาร์บอน (C) จะได้ Cr_2O_3



2.3 เซอร์โคเนีย

เซอร์โคเนียที่เกิดตามธรรมชาติโดยทั่วไปจะพบอยู่ในรูปของแร่แบดเดิลไต์ (Baddeleyite) หรือเซอร์คอน (ZrSiO_4) ซึ่งการที่จะได้เซอร์โคเนียที่บริสุทธิ์นั้น จะต้องทำการแยกสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตที่ซับซ้อนและทันสมัย เซอร์โคเนียบริสุทธิ์ที่ได้จะอยู่ในวัฏภาคแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) ที่อุณหภูมิห้อง และจะเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal Phase) และลูกบาศก์ (Cubic Phase) เมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งผลของการเปลี่ยนโครงสร้างนี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูงถึง 3% - 5% ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เราไม่สามารถใช้ประโยชน์จากเซอร์โคเนียบริสุทธิ์ได้ (R. Stevens, 1986)



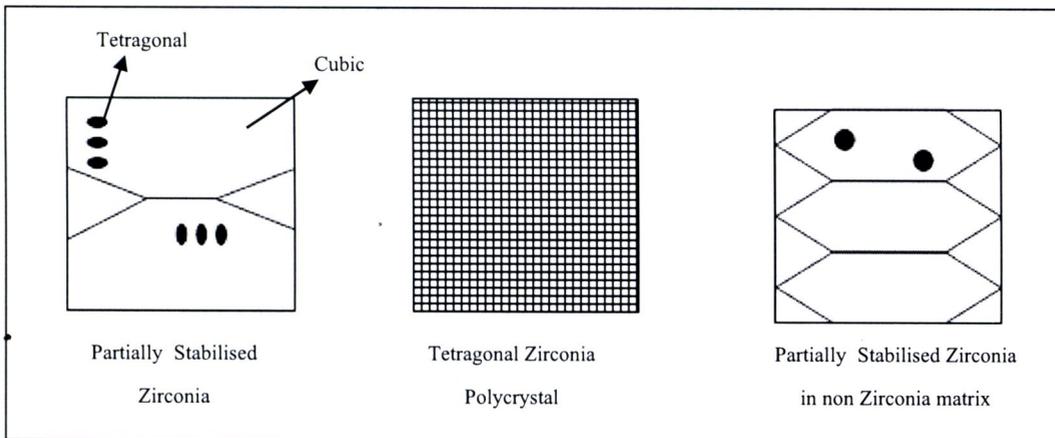
รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนีย ณ อุณหภูมิต่าง ๆ (K.K. Chawla, 1993)

แต่ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณดังกล่าวนี้ก็จะเป็นจุดเด่นพิเศษของเซอร์โคเนียที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยการเติมสารบางตัวที่เรียกว่าสารสร้างความเสถียร (Stabilizer) เมื่อเติมสารดังกล่าวแล้ว เซอร์โคเนียจะสามารถนำมาใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้และยังเกิดสมบัติพิเศษที่สำคัญประการหนึ่งคือ ความเหนียว

2.4 รูปแบบเสถียรของเซอร์โคเนีย

ดังได้กล่าวในเบื้องต้นแล้วว่า เซอร์โคเนียไม่สามารถนำมาใช้งานได้ตามลำพังที่อุณหภูมิห้องจำเป็นที่จะต้องเติมสารสร้างความเสถียรบางตัวเข้าไป โดยสารที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อิตเทียมออกไซด์ (Y₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยสารดังกล่าวนี้จะทำให้เซอร์โคเนียสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องโดยจะไปทำให้โครงสร้างของเซอร์โคเนียเสถียรในรูปเตตระโกนอลหรือลูกบาศก์ การเติมสารสร้างความเสถียรที่ต่างชนิดและปริมาณที่ต่างกันจะทำให้ได้ โครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะความต่างของโครงสร้างจุลภาค ได้เป็น 3 ลักษณะคือ

1. Partially Stabilised Zirconia
2. Tetragonal Zirconia Polycrystal
3. Partially Stabilised Zirconia in a non Zirconia matrix



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเซอร์โคเนีย ทั้ง 3 ระบบ (Richard H.J.

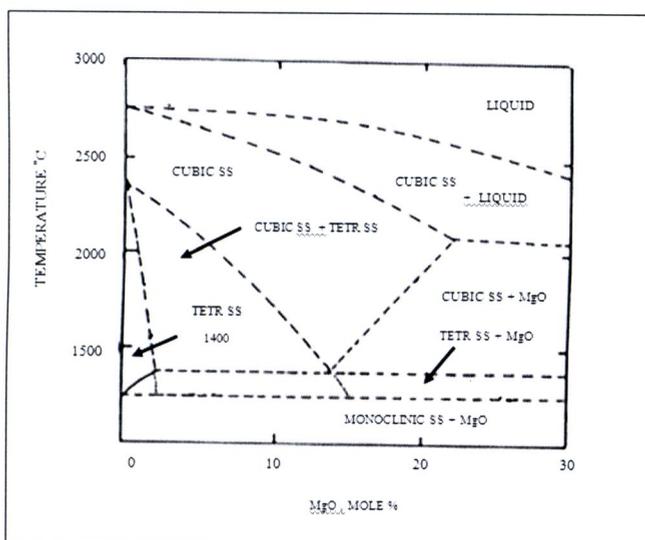
Hannink, Patrick M. Kelly, and Barry C. Muddle, 2000)

ซึ่งจากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันจึงทำให้เกิดชื่อเรียกและสัญลักษณ์ของเซอร์โคเนียแตกต่างกันออกไปเช่น

- TZP Tetragonal Zirconia Polycrystal
- PSZ Partially Stabilised Zirconia
- FSZ Fully Stabilised Zirconia
- TTC Transformation Toughened Ceramics
- ZTA Zirconia Toughened Alumina
- TTZ Transformation Toughened Zirconia

2.4.1 Partially Stabilised Zirconia

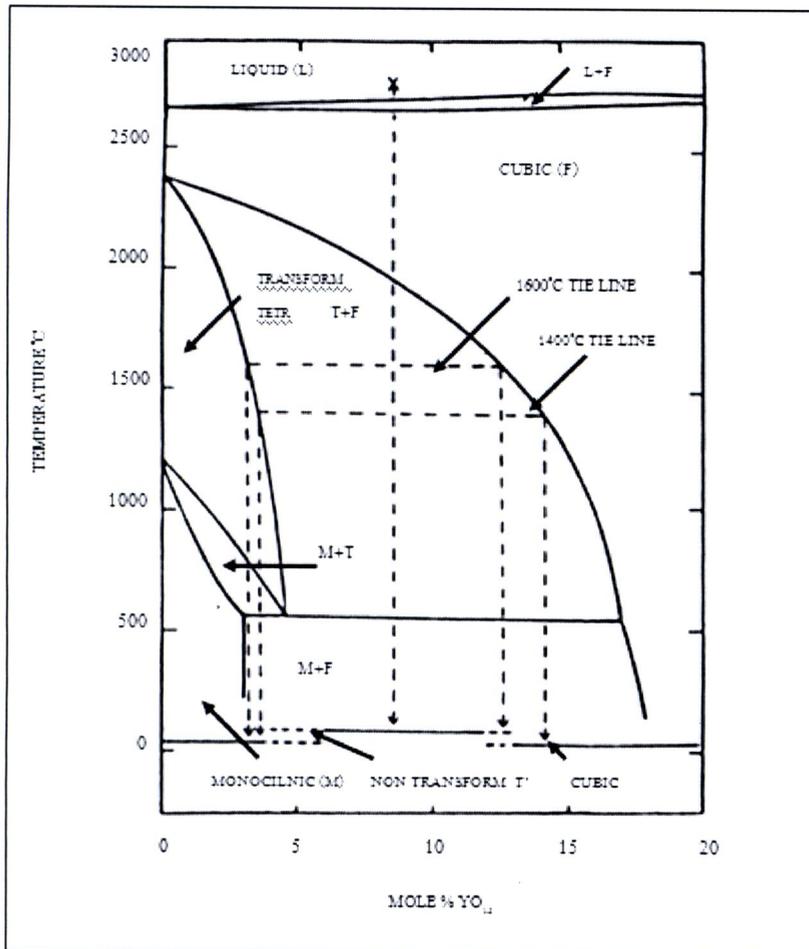
คือ ลักษณะของเซอร์โคเนียที่บางส่วนเสถียร (Stable) ในวัฏภาคเตตระโกนอลแล้วกระจายอยู่ในวัฏภาคลูกบาศก์ โดยทั่วไปการทำให้เกิดโครงสร้างลักษณะนี้จะใช้ MgO และ CaO เป็นสารสร้างความเสถียร โดยหากพิจารณาจากแผนภูมิวัฏภาคในรูปที่ 2.4 ในระบบของ ZrO_2 และ MgO เมื่อเราพิจารณาปริมาณของ MgO ในช่วง 6%mol - 8%mol จะพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ $2000^{\circ}C - 2450^{\circ}C$ เกิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ในวัฏภาคลูกบาศก์ หากทำให้สารละลายของแข็งนี้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) มาอยู่ในบริเวณที่เกิดสารละลายของแข็ง วัฏภาคลูกบาศก์ และวัฏภาคเตตระโกนอลในบริเวณนี้จะเกิดนิวเคลียสของสารละลายของแข็งวัฏภาคเตตระโกนอล ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของนิวเคลียสได้ โดยการคุมอัตราการลดอุณหภูมิ (Cooling Rate) จากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมาที่อุณหภูมิห้องจากการบวกรวดกล้าจะได้ PSZ ซึ่งผลึกของ t- ZrO_2 นี้จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็นโมโนคลีนิกเซอร์โคเนีย (m- ZrO_2) ได้เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งเป็นกระบวนการการเกิดความเหนียวที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิวัฏภาคของ MgO ใน ZrO_2 (Grain C.F., 1967)

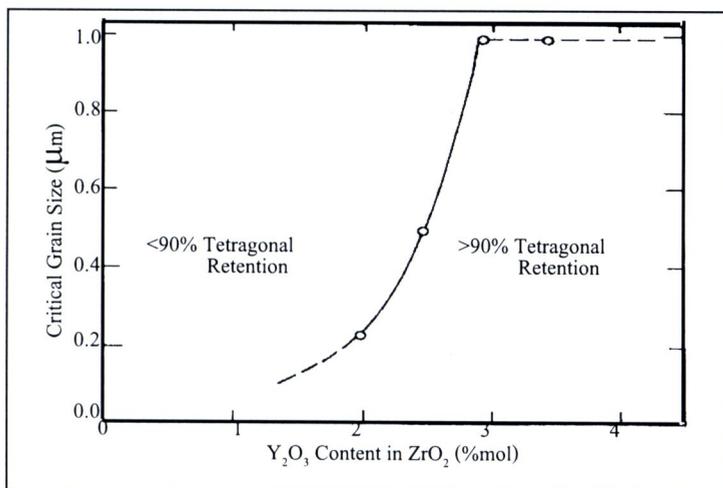
2.4.2 Tetragonal Zirconia Polycrystal (TZP)

คือ เซอร์โคเนียที่เสถียรอยู่ในวัฏภาคเตตระโกนอลทั้งหมด โดยทั่วไปจะเกิดจากการใช้ Y_2O_3 เป็นสารสร้างความเสถียร หากพิจารณาแผนภูมิวัฏภาคในระบบ $ZrO_2-Y_2O_3$ (รูปที่ 2.5) บริเวณ 0%mol - 5%mol ของ Y_2O_3 จะพบว่าในช่วงอุณหภูมิประมาณ $1300^{\circ}C$ ถึง $1650^{\circ}C$ เซอร์โคเนียจะอยู่ในวัฏภาคเตตระโกนอลเกือบ 100% ซึ่งหากทำให้เซอร์โคเนียที่อยู่ในสภาพดังกล่าวเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง จะได้เซอร์โคเนียที่อยู่ในรูปของ TZP จากการศึกษาสมบัติระหว่างความแข็งแรงกับขนาดอนุภาคของ TZP พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่เกินกว่าขนาดวิกฤต (Critical Size) (แสดงในรูปที่ 2.6) โครงสร้างเตตระโกนอล จะสามารถเปลี่ยนวัฏภาคได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งผลของการเปลี่ยนวัฏภาคนี้จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุลดลง (R. Stevens, 1986)



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภูมิวัฏภาคของ Y_2O_3 ใน ZrO_2 (Miller R.A., Smialek R.G., and Garlick, 1981)

จากที่กล่าวเบื้องต้นว่าขนาดของเกรน (Grain Size) ของ TZP มีผลต่อค่าความแข็งแรงดังนั้นจึงมีการศึกษาหาขนาดวิกฤตที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนียพบว่า ขนาดวิกฤตขึ้นอยู่กับปริมาณของสารสร้างความเสถียรที่เติมลงไป ดังรูปที่ 2.6 (R. Stevens, 1986)



รูปที่ 2.6 แสดงผลของปริมาณสารสร้างความเสถียรกับขนาด Critical Grain Size (R. Stevens, 1986)

2.4.3 Partially Stabilised Zirconia in a non Zirconia matrix

คือ เซอร์โคเนียที่มีความละเอียดระดับไมครอนกระจายอยู่ในเนื้อหลัก (Matrix) อื่น ที่ไม่ใช่ เซอร์โคเนีย เช่น อะลูมินาหรือมุลไลต์ หากกระจายอยู่ในเนื้อหลักที่เป็นอะลูมินาโดยทั่วไป จะเรียกว่า Zirconia Toughened Alumina (ZTA) หรือหากเซอร์โคเนียถูกกระจายอยู่ในเนื้อหลักซึ่งเป็นมุลไลต์ก็จะถูกเรียกว่า Zirconia Toughened Mullite (ZTM)

2.5 กระบวนการเกิดความเหนียวของเซอร์โคเนีย

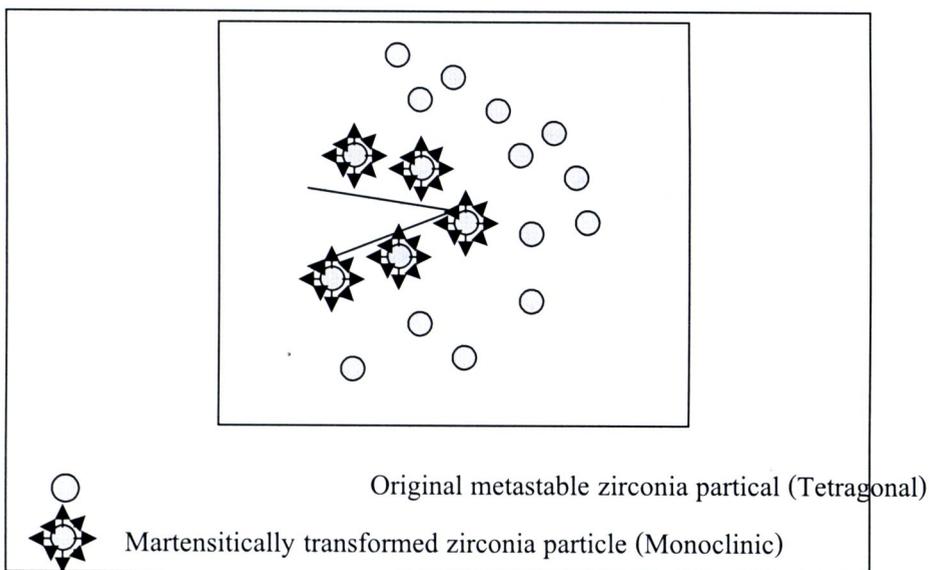
2.5.1 กระบวนการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนีย

คือ การเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคของเซอร์โคเนียจาก $t\text{-ZrO}_2$ เป็น $m\text{-ZrO}_2$ โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการลดอุณหภูมิหลังจากการเผาผลาญ เซอร์โคเนียจะเกิดการเปลี่ยน วัฏภาคจาก $t\text{-ZrO}_2$ เป็น $m\text{-ZrO}_2$ ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C อย่างไรก็ตาม เซอร์โคเนียที่มีขนาดอนุภาคเล็กหรือถูกบังคับโดยวัฏภาคหลัก (เช่น เซอร์โคเนียที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของอะลูมินา) เซอร์โคเนียเหล่านี้จะสามารถคงตัวอยู่ในสภาวะอุปเสถียรของ $t\text{-ZrO}_2$ ได้ กระบวนการการเกิด ความเหนียวโดยการเปลี่ยนวัฏภาคนี้อาจเริ่มขึ้นเมื่อ มีรอยร้าวเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน รอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลทำให้บริเวณที่มีรอยร้าวเกิดแรงเค้น ซึ่ง

พลังงานส่วนนี้จะทำให้เซอร์โคเนียที่อยู่ในสถานะอุปเสถียรของ $t\text{-ZrO}_2$ เปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของ $m\text{-ZrO}_2$ ซึ่งผลของการเปลี่ยนวัฏภาคนี้จะทำให้เซอร์โคเนียเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยจะขยายตัวประมาณ 3% ส่งผลให้เกิดแรงกดบริเวณปลายของรอยร้าว จึงทำให้รอยร้าวไม่สามารถวิ่งต่อไปได้

ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการเกิดความเหนียวนี้คือ ขนาดของอนุภาคเซอร์โคเนีย กล่าวคือ เซอร์โคเนียจะมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนวัฏภาคเนื่องจากแรงดันที่เกิดโดย รอยร้าวขนาดหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะเรียกขนาดนี้ว่าขนาดวิกฤต (Critical Size) ถ้าอนุภาคของเซอร์โคเนียมีขนาดเล็กไปกว่าขนาดวิกฤต เซอร์โคเนียจะไม่ยอมเปลี่ยนวัฏภาคเมื่อมีรอยร้าวขึ้นในชิ้นงาน แต่ถ้าเซอร์โคเนียมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินกว่าขนาดวิกฤต เซอร์โคเนียจะเปลี่ยนวัฏภาคเองโดยธรรมชาติ ซึ่งขนาดวิกฤตนี้จะถูกกำหนดโดย การบ่งคับของวัฏภาคหลัก และธรรมชาติของเซอร์โคเนียเอง (R. Stevens, 1986)

จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า ความเหนียวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของ $t\text{-ZrO}_2$ หากชิ้นงานมี $t\text{-ZrO}_2$ มากชิ้นงานก็มีแนวโน้มที่จะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (R.W. Cahn, P. Haasen, and E.J.Kramer, 1993)



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดความเหนียวโดยอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาค (R. Stevens, 1986)



2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาด้วยการทำอะลูมินาเป็นวัสดุเชิงประกอบโดยการเติมสารเติมแต่งสมบัติเชิงกล (Additive)

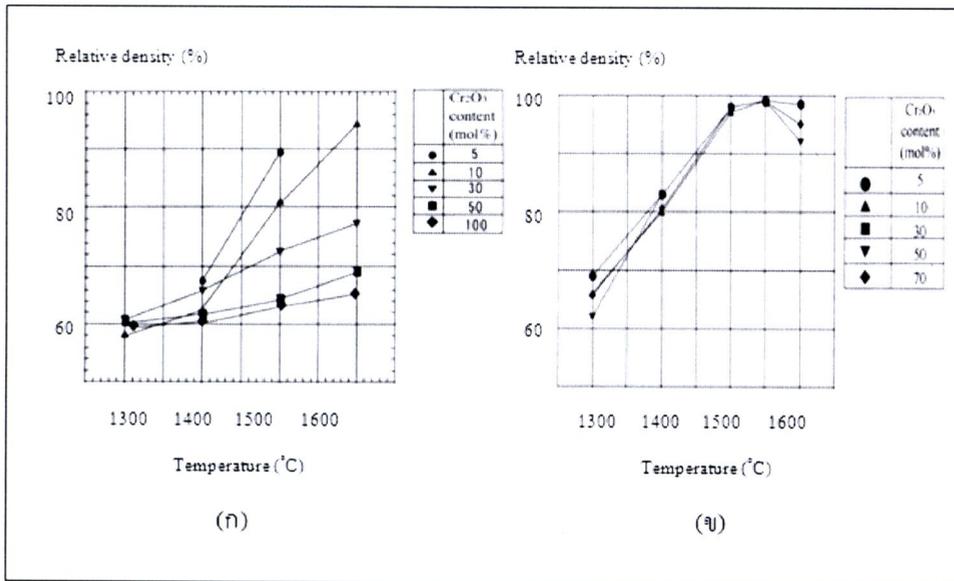
อย่างที่ได้อธิบายไปแล้วว่า โครเมียมนั้นเป็นสารประกอบทางเซรามิกที่มีการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมหลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นเครื่องมือตัดแต่ง (Cutting Tools) รวมถึงใช้เป็นวัสดุขัดถู (Abrasive) และเป็นเสื่อเกราะกันกระสุน เป็นต้น และมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้มีการทำการศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินาโดยใช้โครเมียม

Takehiko Hirata et al. (2000) ได้ศึกษาผลการ Sintering ของระบบ $Al_2O_3-Cr_2O_3$ ซึ่งทำการศึกษาโดยการเติม Cr_2O_3 ใน %mol ที่แตกต่างกันคือ 5 10 30 และ 50%mol Cr_2O_3 ลงไปใน Al_2O_3 จากนั้นนำมาเผาผนึก ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 1300 1400 1500 และ 1600°C ตามลำดับ ในบรรยากาศปกติและสุญญากาศ ผลการทดลองที่ได้พบว่า การเผาผนึกในบรรยากาศปกติ Cr_2O_3 จะเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซ CrO_3 ระเหยออกมาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.4)



ซึ่งมีผลทำให้ Microstructure ที่ได้มีลักษณะหยาบ (Coarsening) และมีรูพรุนมาก และเมื่อทำการเผาผนึกในบรรยากาศสุญญากาศ Microstructure ที่ได้จะมีปริมาณรูพรุนลดลง ส่วนอุณหภูมิในการเผาผนึกที่สูงขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีการหดตัวลดลง ในขณะที่ปริมาณ Cr_2O_3 เพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะต่ำและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาผนึก

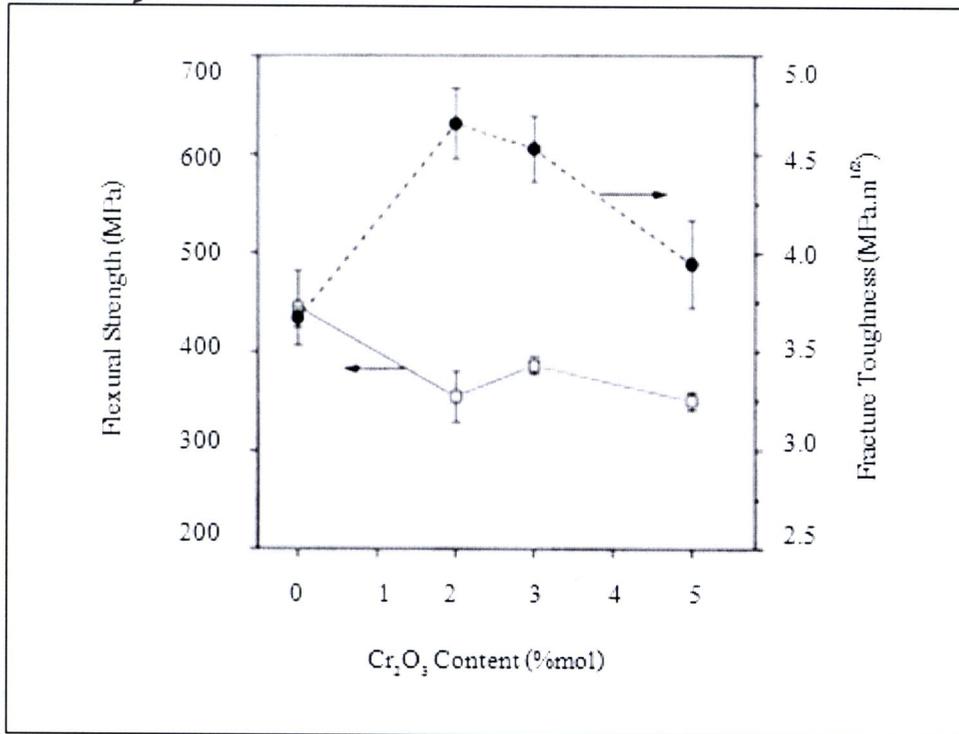




รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของวัสดุ Al₂O₃-Cr₂O₃ เซรามิก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) บรรยากาศปกติ (ข) บรรยากาศสุญญากาศ

(Takehiko Hirata et al., 2000)

Doh-Hyung Riu et al. (2000) ได้ศึกษาผลการเติม Cr₂O₃ ลงไปใน Al₂O₃ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของ Al₂O₃ โดยการเติม Cr₂O₃ ใน %mol ที่แตกต่างกันไปคือ 0 2 5 และ 10%mol จากนั้นนำแต่ละตัวอย่างไปทำการขึ้นรูปด้วยวิธี hot press ด้วยความดัน 40 MPa และเผาเหนียวที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่า Cr₂O₃ ที่เติมเข้าไปนั้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ในขณะที่ค่าความแข็งและความเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเติม Cr₂O₃ ในปริมาณที่มากเกินไปก็จะทำให้สมบัติทางกลของ Al₂O₃ ลดลง ซึ่งสาเหตุนี้เกิดจากความผิดปกติของเกรน ซึ่งเกรนโตและมีลักษณะรูปร่างเป็น Platelike เกิดจาก Cr ions ที่อยู่ผิวของ Al₂O₃ ที่อยู่ติดกับ Cr₂O₃ จะมี Cr ions จำนวนมาก ส่งผลให้เกรนโตอย่างรวดเร็วและบริเวณ Boundary มีลักษณะ ไม่พอดีกัน (Misfit) โดย %mol Cr₂O₃ ที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ที่ Al₂O₃+ 2%mol Cr₂O₃ ซึ่งเมื่อเติมเข้าไปแล้วจะมีค่าความเหนียวประมาณ 4.7 MPa.m^{1/2} และมีค่าความแข็งประมาณ 1738 Kg/mm²



รูปที่ 2.9 แสดงค่าความแข็งแรงและค่าความเหนียวของ Al₂O₃ ที่ %mol ของ Cr₂O₃ ที่แตกต่างกัน (Doh-Hyung Riu et al., 2000)

K. Shibata et al. (1997) ได้ศึกษาผลของสมบัติทางกลของ Al₂O₃-Cr₂O₃ โดยการเติม Al₂O₃ ใน %mol ที่แตกต่างกัน คือ 0 5 10 15 20 และ 25%mol จากนั้นนำแต่ละตัวอย่างไปทำการขึ้นรูปด้วยวิธี HIP ภายใต้ความดัน 196 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงและความเหนียวที่วัดได้ มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ประมาณ 23.4 GPa และ 4.0 MPa.m^{1/2} ส่วนค่าความแข็งแรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ %mol Al₂O₃ เพิ่มขึ้น โดยสูงสุดจะอยู่ที่ 25%mol Al₂O₃ จะมีค่าประมาณ 380 MPa ซึ่งเกิดจาก Al₂O₃ ที่เติมเข้าไปจะมีผลทำให้ Cr₂O₃ มีขนาดของเกรนลดลง จึงทำให้ความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาระบบอะลูมินา-โครเมีย (Al₂O₃-Cr₂O₃) นั้น พบว่าการเติมโครเมีย (Cr₂O₃) ลงไปสามารถที่จะทำให้อะลูมินามีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นได้จริง (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) แต่ก็พบว่ายังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานทำเป็นเกราะกันกระสุน กล่าวคือ โครเมียที่เติมลงไปใส่อะลูมินานั้นสามารถทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย

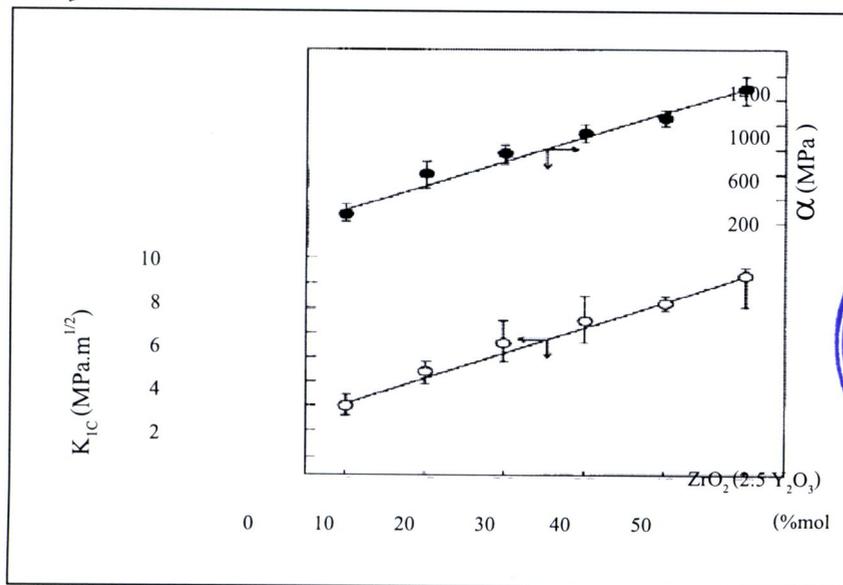
ตารางที่ 2.1 แสดงผลสรุปสมบัติทางกลที่ได้จากการศึกษาระบบ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ของงานวิจัยต่าง ๆ

ผลงานวิจัย	Materials	Composition (%mol)	Mechanical properties		
			K_{IC} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	MOR (MPa)	Hv (GPa)
Doh-Hyung Riu	Al_2O_3	100	3.7	455	16.81
K. Shibata	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Cr}_2\text{O}_3$	25/75	4.0	380	23.40
Doh-Hyung Riu	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Cr}_2\text{O}_3$	98/2	4.7	355	17.38

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำ เซอร์โคเนีย (ZrO_2) มาใช้เป็นสารเติมแต่งสมบัติด้านความเหนียวให้แก่ อะลูมินา-โครเมียมเซรามิก เนื่องจากเซอร์โคเนียมีสมบัติด้านความเหนียวที่เด่นกว่าเซรามิก ชนิดอื่น ๆ ดังจะเห็นได้จาก มีงานวิจัยจำนวนมากได้ใช้เซอร์โคเนียเป็นสารเติมแต่งสมบัติด้านความเหนียว

W. H Tuan et al. (2002) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของ Al_2O_3 โดยการเติม ZrO_2 ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 5 7.5 10 12.5 และ 15%vol ZrO_2 จากนั้นนำมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธี Pressureless Sintering ด้วยความดัน 44 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ZrO_2 ที่เติมเข้าไปสามารถที่จะปรับปรุง Al_2O_3 ให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นได้โดยที่ %vol ZrO_2 ที่ให้ค่าสูงที่สุดจะอยู่ที่ 12.5%vol ZrO_2 คือเมื่อเติมเข้าไปแล้วจะมีค่าความแข็งแรงประมาณ 575 MPa และมีค่าความเหนียวประมาณ $5.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

- Yoshihiko Takano et al. (1998) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของ $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2(2.5\text{Y}_2\text{O}_3)$ โดยการเติม ZrO_2 ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 9.75(0.25 Y_2O_3) 19.5(0.5 Y_2O_3) 29.25(0.75 Y_2O_3) 39.0(1.0 Y_2O_3) และ 48.75(1.25 Y_2O_3) ทำการขึ้นรูปด้วยวิธี SPS ด้วยความดัน 30 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าที่ %mol $\text{ZrO}_2(2.5\text{Y}_2\text{O}_3)$ มากขึ้น ค่าความแข็งแรงจะลดลง ในขณะที่ความเหนียวและความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่ 48.75(1.25 Y_2O_3) จะให้ค่าสูงที่สุดคือ $9.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ และ 1290 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แสดงค่าการปรับปรุงสมบัติความเหนียวและค่าความแข็งแรงของแต่ละตัวอย่าง โดยการใช้เซอร์โคเนีย (Yoshihiko Takano et al., 1998)

L. Pla Zanet et al. (1999) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของ NiAl โดยการเติม ZrO₂ กับ SiC ที่ %vol ที่แตกต่างกันคือ 0 5 10 15 และ 30%vol จากนั้น นำแต่ละตัวอย่างมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธี hot press ด้วยความดัน 30 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400°C เป็นเวลา 5 นาที ผลการทดลองที่ได้พบว่า SiC ที่เติมเข้าไปนั้นสามารถช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรงของ NiAl ได้ ส่วน ZrO₂ ที่เติมเข้าไปนั้นสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความแข็งแรง และความเหนียวได้โดยที่ 15%vol ZrO₂ จะให้ค่าความแข็งแรง และความเหนียวสูงที่สุดคือ 735.MPa และ 11.3 MPa.m^{1/2} ตามลำดับ

Sui Lin Shi et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความเหนียวของ Ti₃SiC₂ โดยการเติม 3Y-TZP โดยได้ทำการทดลองโดยการเติม 3Y-TZP ที่ 0 10 30 และ 50%vol 3Y-TZP จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยวิธี SPS ด้วยความดัน 50 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 5 นาที จากผลการทดลองที่ได้พบว่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อ %3Y-TZP เพิ่มขึ้น ส่วนที่ 30%vol 3Y-TZP ค่าความเหนียวจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 11.94 MPa.m^{1/2} ส่วนค่าความแข็งแรงจะมีค่าลดลงเมื่อ %3Y-TZP เพิ่มขึ้น

ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่าเซอร์โคเนียนั้นมีสมบัติเด่นในการช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณวิภาค และอุณหภูมิการเผาผนึกที่เหมาะสม