

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

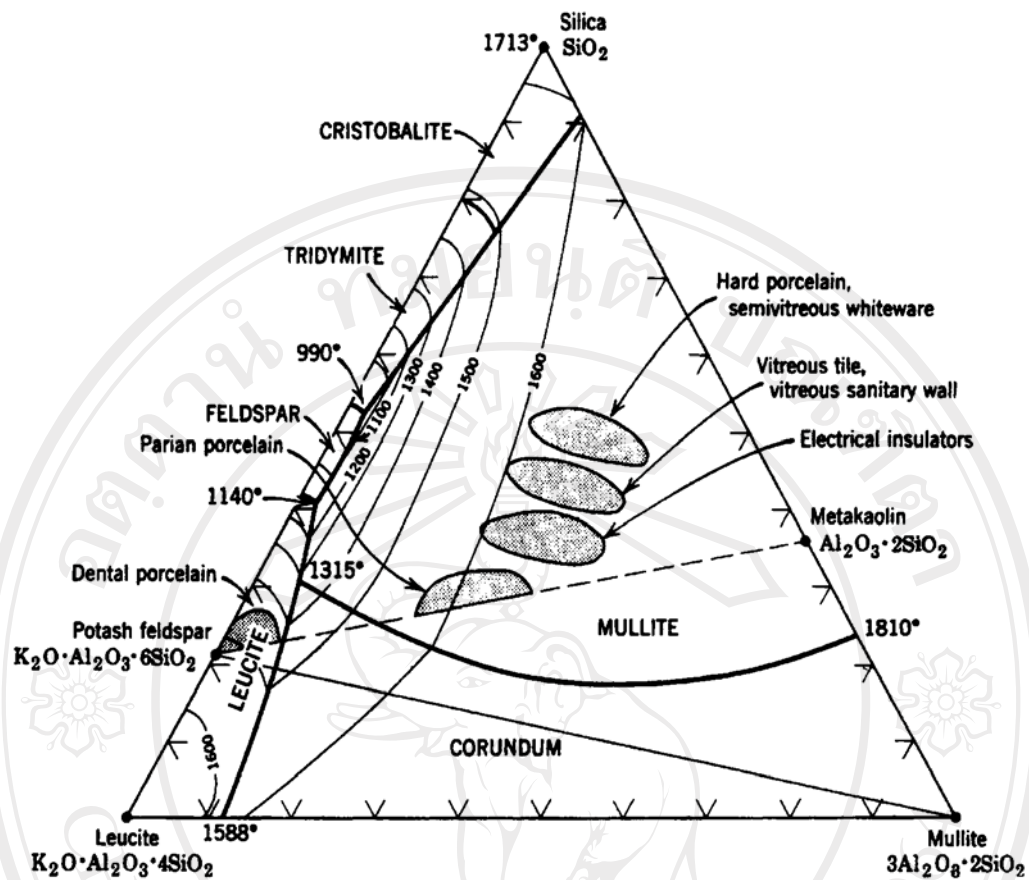
ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิก วัสดุนาโนคอมโพสิต และการเสริมแรงเซรามิกด้วยอะลูมินา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 พอร์ซเลนเซรามิก

พอร์ซเลนเซรามิกเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ทันตแพทย์นิยมเลือกนำมาใช้ทดแทนฟันที่สึกหรอ หรือสูญเสียไปในผู้ป่วยหรือผู้ที่มีปัญหาเกี่ยวกับฟัน เนื่องจากสมบัติของพอร์ซเลนเซรามิกดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

2.1.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับพอร์ซเลนเซรามิก

ในหลายศตวรรษที่ผ่านมาได้มีการใช้วัสดุหลากหลายชนิดในการประดิษฐ์เป็นฟันปลอม ตัวอย่างเช่น เขี้ยวสัตว์ กระดูก ฟันมนุษย์ ขี้ผึ้ง เซรามิก และโลหะ วัสดุที่ใช้ใส่แทนที่ฟันที่หายไป นั้นได้รับการพัฒนาอย่างช้า ๆ ตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1774 เกสซกรชาวฝรั่งเศสชื่อ Duchâteau และทันตแพทย์ชื่อ Chemant [10] เป็นคนแรกที่ได้ทำการประดิษฐ์ฟันปลอมเซรามิกจากพอร์ซเลนขึ้นมา โดยมีวัตถุดิบหลักประกอบไปด้วย kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) potash feldspar ($\text{K}_2\text{OAl}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$) และ quartz (SiO_2) หรือที่เรียกกันว่าระบบ $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ มีแผนภาพเฟสดังรูป 2.1 ซึ่งพอร์ซเลนเซรามิกจะเกิดจากการผสมวัตถุดิบทั้งสามชนิดด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม [11] มีการเติมเม็ดสี อนุภาคทึบแสงและแก้วลงไปเพื่อควบคุมอุณหภูมิหลอม อุณหภูมิ การเผาขึ้นเทอร์ สัมประสิทธิ์การหดตัวเชิงความร้อน (thermal contraction coefficient) ส่วนประกอบโดยประมาณของผงพอร์ซเลนที่ใช้ในปัจจุบันแสดงดังตาราง 2.3 ซึ่งจะพบว่าการเติมออกไซด์ของโลหะลงไปเพื่อทำให้สีของพอร์ซเลนมีความคล้ายคลึงกับฟันธรรมชาติ [10]



รูป 2.1 แผนภาพเฟสของพอร์ซเลนในระบบ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ [12]

ตาราง 2.1 ส่วนประกอบโดยประมาณของผงพอร์ซเลนที่ใช้ในปัจจุบัน [10]

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO_2	59.2
Al_2O_3	18.5
Na_2O	4.8
K_2O	11.8
B_2O_3	4.6
ZnO	0.6
ZrO_2	0.4
อื่น ๆ *	0.1

* ประกอบด้วย LiO_2 , MgO และ P_2O_5

ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุทั้ง 4 กลุ่ม คือ โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และคอมโพสิต มาใช้ในทางทันตกรรม นอกจากการพัฒนาสมบัติทางกายภาพแล้ว ตลอดศตวรรษที่ 21 ที่ผ่านมาก็ได้มีการพัฒนาสมบัติที่สำคัญบางประการเพื่อให้วัสดุเหล่านี้มีความเหมาะสมในทางทันตกรรมบูรณะ กล่าวคือ

- 1) สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อภายในช่องปากได้ดี
- 2) ยึดเกาะได้อย่างถาวรกับทั้งตัวฟันและรากฟัน
- 3) มีลักษณะ สี สัน และความสวยงามเหมือนกับฟันธรรมชาติ
- 4) มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ และ
- 5) เนื้อเยื่อของฟันธรรมชาติสามารถเติบโตบนวัสดุเหล่านี้ได้ในกรณีที่เกิดแผลหรือความผิดปกติของเนื้อเยื่อ

ในปัจจุบันนี้มีแนวโน้มของความต้องการใช้ฟันปลอมชนิดพอร์ซเลนมีมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีสมบัติดังที่กล่าวมา [10]

2.1.2 สมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิก

เนื่องจากสมบัติทางกลของฟันพอร์ซเลนที่ประดิษฐ์ขึ้นมานั้น จะเป็นดัชนีสำคัญในการบ่งชี้ว่าฟันพอร์ซเลนดังกล่าวจะมีความเหมาะสมเพียงพอในการนำมาใช้งานจริงได้หรือไม่ ดังนั้นรายละเอียดในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาสมบัติทางกลและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Jones [13] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของฟันพอร์ซเลนกับฟันธรรมชาติ โดยวิธีการทดสอบด้วยการกดแบบวิกเกอร์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟันพอร์ซเลนที่มีโครงสร้างภายในเป็นเนื้อแก้วนั้น มีค่าความแข็งแรงประมาณ 520 – 640 MPa ในขณะที่ฟันธรรมชาติมีค่าความแข็งแรงประมาณ 50 MPa เท่านั้น Jones และ Wilson [14] ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูพรุนและความแข็งแรงของพอร์ซเลน โดยใช้ค่ามอดูลัสของการแตกร้าว (modulus of rupture) เป็นดัชนีวัดค่าความแข็งแรง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าพอร์ซเลนที่ประกอบด้วยรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่ามอดูลัสของการแตกร้าวมากกว่า นอกจากนี้ Creyke [15] ยังพบอีกว่าค่าความแข็งแรงของพอร์ซเลนจะมีค่าสูงขึ้นถึงประมาณร้อยละ 50 ถ้าสามารถลดปริมาณของรูพรุนลงได้ประมาณร้อยละ 10 เนื่องจากแรงที่กระทำลงบนชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณของรูพรุนน้อยมาก ๆ หรือไม่มียูพรุนเลยนั้นจะสามารถแพร่กระจายไปทั่วทุกบริเวณของชิ้นงาน จึงไม่เกิดการสะสมของแรงเค้นในบางบริเวณขึ้นมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีรูพรุนอยู่ ในปี ค.ศ. 2002 Cheung และ Darvell [16] ได้ทำการศึกษาหาอิทธิพลของระยะเวลาเผาแซ่และอุณหภูมิเผาซินเทอร์ที่มีต่อ

ลักษณะของรูพรุนในฟันพอร์ซเลน โดยใช้เวลาเผาแซ่ในช่วงเวลา 30 นาที จนถึง 20 ชั่วโมง ด้วยอุณหภูมิเผาซินเทอร์ในช่วง 800 จนถึง 1050°C จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะและจำนวนของรูพรุนจากภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อใช้คำนวณหาจำนวนของรูพรุน ซึ่งผลจากการตรวจสอบพบว่าอุณหภูมิในการเผาแซ่จะมีอิทธิพลต่อปริมาณของรูพรุนมากกว่าเวลาในการเผาแซ่ ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิเผาซินเทอร์ที่สูงและใช้เวลาในการเผาแซ่น้อย จะส่งผลให้ปริมาณและขนาดของรูพรุนลดลง ทำให้ชิ้นงานมีความโปร่งแสง (ความสามารถในการทะลุผ่านของแสง) ที่ดี เพราะถ้ารูพรุนมีขนาดใหญ่หรือใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคเริ่มต้นของวัตถุดิบแล้ว จะทำให้การดูดกลืนแสงมีค่ามากไปส่งผลให้ความโปร่งแสงลดน้อยลง ในปี ค.ศ. 2004 Lee และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาปริมาณน้ำที่มีผลต่อความแข็งแรงของพอร์ซเลนเซรามิก โดยใช้ค่าความทนแรงดัดโค้งและความต้านทานต่อรอยแยกเป็นดัชนีวัดค่าความแข็งแรง ด้วยการใช้ค่าความทนแรงดัดโค้งที่วัดได้จากวิธีการทดสอบแบบกด 3 จุด (three-point bending test) และค่าความต้านทานต่อรอยแยกที่วัดได้จากวิธีการทดสอบด้วยการกดแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test) จากการทดลองพบว่าพอร์ซเลนเซรามิกที่ผ่านการอบแห้งก่อนนำไปเผาซินเทอร์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ มีความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นจาก 37.70 เป็น 58.26 MPa และความต้านทานต่อรอยแยกเพิ่มขึ้นเป็น 52.72 N/m²

Fischer และ Marx [18] ได้ทำการศึกษาความต้านทานต่อรอยแยกของฟันเซรามิก โดยอาศัยสมการคำนวณหาค่าความต้านทานต่อรอยแยกที่มีค่าคงที่ ξ (เรียกว่า prefactor ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของเซรามิกแต่ละชนิด) เป็นดัชนีบ่งถึงความสามารถในการเกิดรอยร้าวของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกระแทก ซึ่งปกติจะนิยมใช้ค่า ξ ตามมาตรฐาน ISO ฉบับที่ TC 206 โดยในการทดลองนี้ได้คำนวณหาค่า prefactor ด้วยการใช้ค่าความแข็งแรงที่วัดได้จากวิธีการทดสอบด้วยการกดแบบวิกเกอร์ และใช้ค่าความต้านทานต่อรอยแยกที่วัดได้จากวิธีการทดสอบแบบกด 4 จุด (four-point bending test) ลงในสมการ 2.1

$$K_{IC} = \xi(E/H)^{1/2}(P/c)^{3/2} \quad (2.1)$$

เมื่อ K_{IC} คือ ค่าความต้านทานต่อรอยแยก (MPa.m^{1/2})

ξ คือ ค่าดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการเกิดรอยร้าวสำหรับฟันเซรามิก

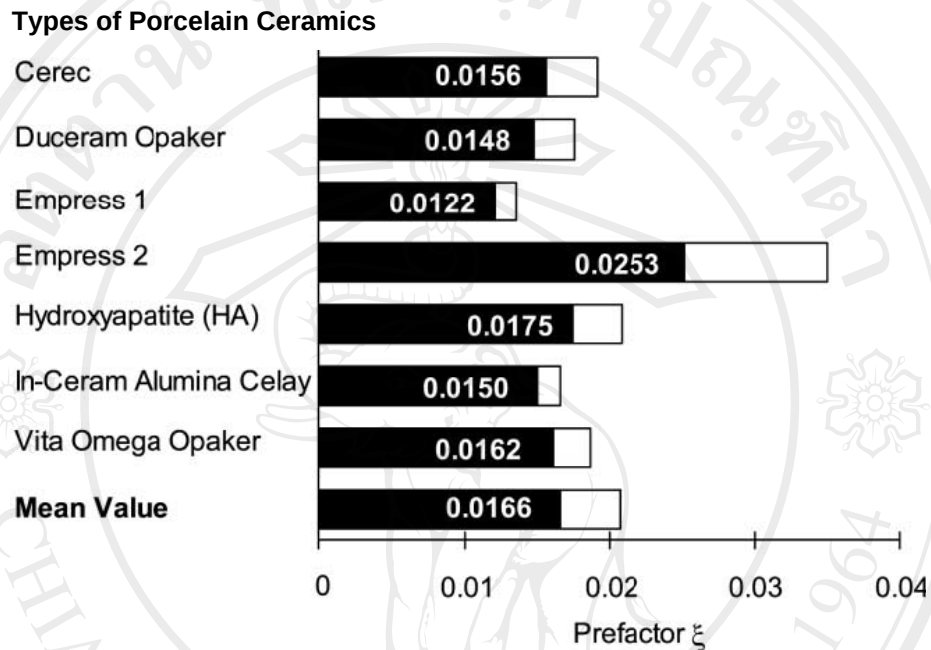
E คือ ค่ามอดูลัสของยัง (GPa)

H คือ ค่าความแข็ง (GPa)

P คือ น้ำหนักที่ใช้กดลงบนผิวชิ้นงาน (kg) และ

c คือ ค่าความยาวของรอยแตกจากจุดศูนย์กลาง (μm)

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของ prefactor ที่คำนวณได้และค่ามาตรฐานมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูป 2.2 นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างจุลภาคของฟันเซรามิกที่นำมาทดสอบทุกชนิดจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยมีโครงสร้างของผลึกกระจายตัวอยู่ในเฟสหลักที่เป็นแก้ว (glassy matrix)



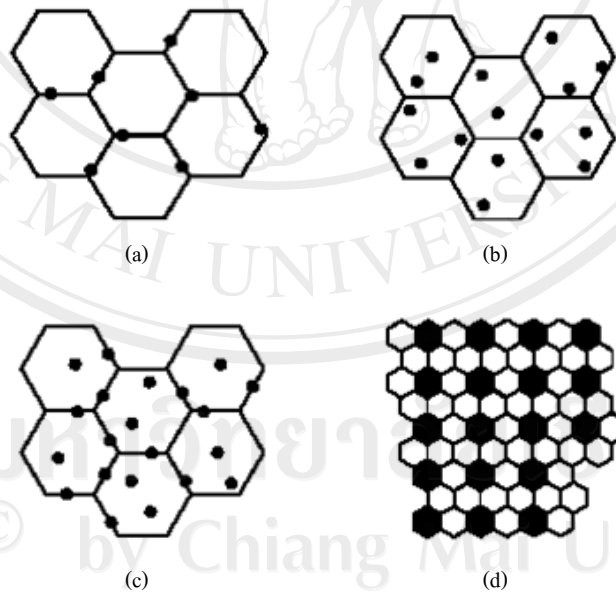
รูป 2.2 ค่า prefactor ของพอร์ซเลนเซรามิกประเภทต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 [18]

2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเซรามิกนาโนคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่เกิดขึ้นโดยการผสมกัน หรือประกอบกันของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ให้ยึดติดกันเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มิใช่เป็นการละลายวัสดุชนิดหนึ่งในอีกชนิดหนึ่ง โดยการยึดติดกันนี้ยังสามารถแบ่งแยกวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบได้ด้วยตา, กล้องแสง หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน วัสดุผสมจึงเป็นวัสดุหลายเฟส (multiphase materials) ซึ่งจะมีสมบัติที่เป็นองค์ประกอบรวมของวัสดุผสม และอาจมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปจากสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบรวมของวัสดุคอมโพสิตนั้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุคอมโพสิตจะมีสมบัติในการใช้ประโยชน์ได้เหมาะสมดีกว่าวัสดุชนิดเดียว วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิตนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เฟสเมทริกซ์ (matrix phase) และ เฟสดีสเพิร์ส (dispersed phase) หรือเฟสเสริมแรง (reinforced phase) ซึ่งเมทริกซ์เฟสจะเป็นเฟสที่ทำหน้าที่เชื่อมประสาน และยึดเกาะเฟสเสริมแรงให้รวมเป็นอันเดียวกัน ส่วนเฟสเสริมแรงเป็นองค์ประกอบที่เหลือของวัสดุคอม

โพลีเมอร์ที่กระจายตัวในลักษณะต่างๆ ในเฟสเมทริกซ์ [19] วัสดุคอมโพสิตที่มีขนาดอนุภาคของเฟสเมทริกซ์และ/หรือ เฟสเสริมแรงอยู่ในเรณูของนาโนเมตร (ไม่เกิน 100 นาโนเมตร) เรียกว่า วัสดุนาโนคอมโพสิต ซึ่งทำให้เกิดสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุทั้งทางกายภาพและทางกล ยกตัวอย่างเช่น เพิ่มความเหนียวและความเป็นพลาสติกได้ยิ่งยวดให้กับวัสดุเปราะ [20] รวมถึงการเพิ่มความแข็งแรงและทำให้วัสดุทึบแสงมีความโปร่งแสงมากขึ้น [21-22]

Niihara และคณะ [23] ได้รายงานเรื่องเซรามิกนาโนคอมโพสิตอย่างเป็นทางการในปี ค.ศ. 1991 ซึ่งกระทำโดยการเติมอนุภาคนาโน (เล็กกว่า 1 ไมครอน) ลงไปในเฟสเมทริกซ์ ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ตามขนาดเกรนของเฟสเมทริกซ์และขนาดอนุภาคของเฟสเสริมแรง คือ 1) อนุภาคนาโนของเฟสเสริมแรงกระจายตัวอยู่ระหว่างเกรนของเฟสเมทริกซ์ (intergranular nanocomposites) 2) อนุภาคนาโนของเฟสเสริมแรงกระจายตัวอยู่ในเกรนของเฟสเมทริกซ์ (intragranular nanocomposites) 3) อนุภาคนาโนของเฟสเสริมแรงกระจายตัวอยู่ทั้งระหว่างและภายในเกรนของเฟสเมทริกซ์ (inter-intra granular nanocomposites) และ 4) ทั้งเฟสเสริมและเฟสเมทริกซ์มีขนาดอนุภาคอยู่ในเรณูนาโน และกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ (nano-nano composites) ดังแสดงในรูป 2.3

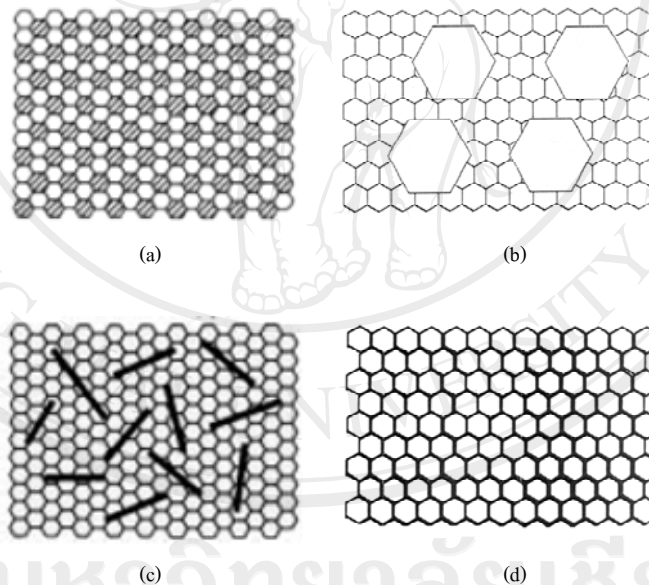


รูป 2.3 การแบ่งกลุ่มนาโนคอมโพสิตของ Niihara [23]

เมื่อ (a) คือ intergranular (b) คือ intragranular (c) คือ inter-intra granular และ (d) คือ nano-nano composites

อย่างไรก็ตาม วัสดุนาโนคอมโพสิตได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของ ไมโคร-นาโน คอมโพสิต มากกว่านาโน-นาโน คอมโพสิต Kuntz และคณะ [9] จึงได้ทำการจัดกลุ่มของเซรามิกนาโนคอมโพสิตใหม่ แสดงดังรูป 2.4 ซึ่งโมเดลใหม่นี้ เฟสเมทริกซ์จะอยู่ในเรือนนาโน ในขณะที่ขนาดของเฟสเสริมแรงเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้เกิดเซรามิกนาโนคอมโพสิต 4 โมเดล คือ

- 1) นาโน-นาโน คอมโพสิต คือ ขนาดเกรนของทั้งเฟสเมทริกซ์และเฟสเสริมแรงมีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร
- 2) นาโน-ไมโคร คอมโพสิต คือ เฟสเมทริกซ์มีขนาดอยู่ในเรือนนาโนและเฟสเสริมแรงอยู่ในระดับไมครอน
- 3) นาโน-เส้นใย คอมโพสิต คือ การใส่เส้นใยขนาดเล็กลงไปในเฟสเมทริกซ์ระดับนาโน
- 4) นาโน-ชั้นนาโน คอมโพสิต คือ เฟสเมทริกซ์ระดับนาโนและชั้นขอบเกรนของเฟสเสริมแรง

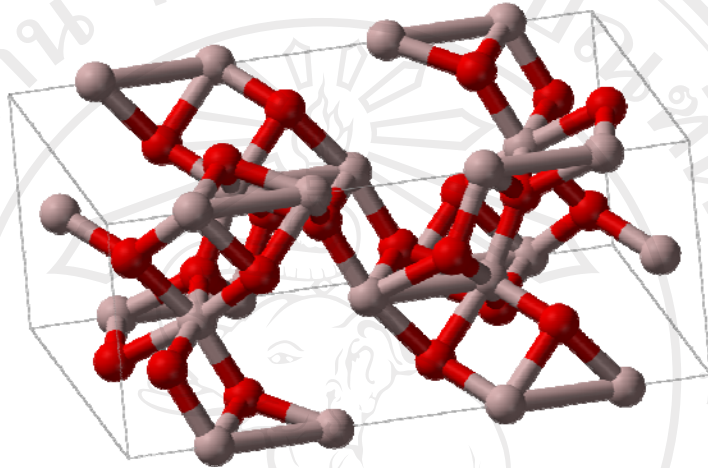


รูป 2.4 การแบ่งกลุ่มนาโนคอมโพสิตของ Kuntz [9]

เมื่อ (a) คือ นาโน-นาโน คอมโพสิต (b) คือ นาโน-ไมโคร คอมโพสิต (c) คือ นาโน-เส้นใย คอมโพสิต และ (d) คือ นาโน-ชั้นนาโน คอมโพสิต

2.3 เซรามิกที่มีการเสริมแรงด้วยอนุภาคของอะลูมินา

อะลูมินา (Alumina) หรือ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอรันดัม (Corundum) มีสูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 มีโครงสร้างผลึกแบบ hexagonal close packed (HCP) [24] แสดงดังรูป 2.5



รูป 2.5 โครงสร้างผลึกแบบ hexagonal close packed (HCP) ของอะลูมินา [24]

ในธรรมชาติจะพบอะลูมินาในรูปทั้งบีต้าอะลูมินา ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$) และแกมมาอะลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) วัตถุดิบอะลูมินาจะไม่ค่อยนำมาใช้งานในกรณีเมื่อมีน้ำอยู่ในโมเลกุล จึงต้องนำไปเผาแคลไซน์ (calcination) ก่อนนำมาใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำจะทำให้เกิดการหดตัวสูงเมื่อไอน้ำออกไป แต่ในที่สุดจะถูกเผาให้เกิดเป็นแอลฟาอะลูมินา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงที่สุด อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีความสามารถทนไฟได้ถึง 1900-2000°C มีจุดหลอมเหลวที่ 2050°C มีความทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี มีความแข็งแรงและมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ด้วยสมบัติดังกล่าวนี้ อะลูมินาจึงนิยมนำมาใช้ในการผลิตวัตถุดิบไฟ หัวเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า เป็นต้น [25] สมบัติเฉพาะตัวบางประการของอะลูมินาแสดงดังตาราง 2.2

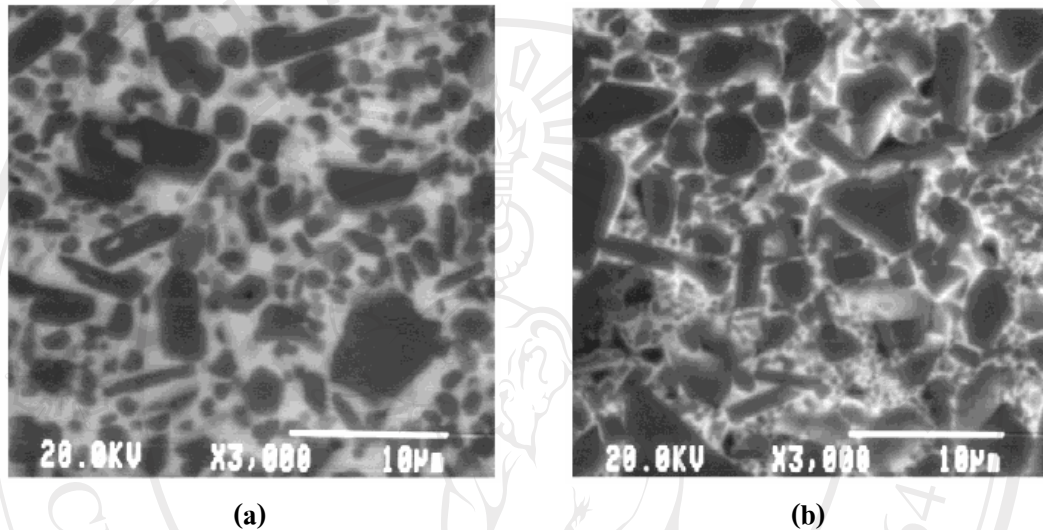
ตาราง 2.2 สมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของอะลูมินา [24-25]

สมบัติ	
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	3.89
สี	ขาวงาช้าง
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	2050
อุณหภูมิซินเทอร์ ($^{\circ}\text{C}$)	1600-1900
ความแข็ง (โมห์สเกล)	9
ความแข็ง (kg/mm^2)	1440
ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	379
มอดูลัสของยัง (GPa)	375
ความต้านทานต่อรอยแตก ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	4

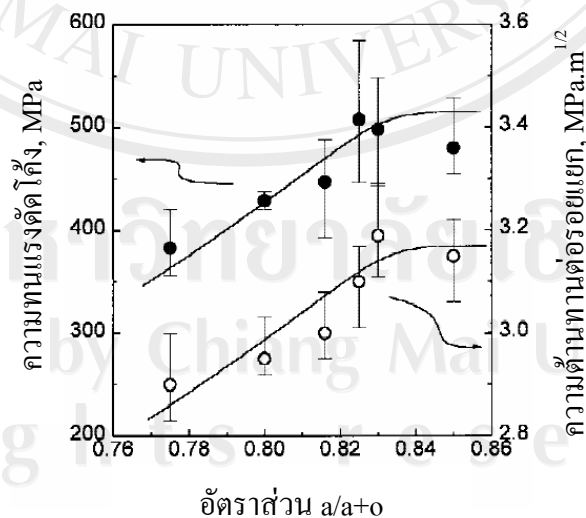
ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการใช้อะลูมินาเป็นเฟสเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตหลาย ๆ ชนิด ตัวอย่างเช่น ในวัสดุพอลิเมอร์มีการเติมอะลูมินาลงไปเป็นเฟสเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการนำความร้อนและความเหนียว (stiffness) ให้กับเฟสเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังมีการเติมอะลูมินาลงไปในเนื้อแก้วเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อรอยแตก ทำให้เนื้อวัสดุคอมโพสิตมีความเปราะน้อยลง และยังทำให้มีความแข็งแรงและความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้สมบัติทางกลของวัสดุดีขึ้นอย่างมากเมื่อในไปใช้ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง [26-27] นอกจากจะเป็นวัสดุเสริมแรงที่ดีแล้ว อะลูมินายังไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมีราคาไม่สูงมากนัก จึงทำให้เป็นที่แพร่หลายในทางการค้า ไม่ว่าจะเป็นผงอะลูมินาบริสุทธิ์หรือผงขัดอะลูมินา [28]

ในปี ค.ศ. 1999 Kim และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของฟิล์มคอมโพสิตที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการ casting แบบต่าง ๆ โดยมีแก้วเป็นเฟสเมทริกซ์ (matrix phase) และใช้อะลูมินาเป็นเฟสเสริมแรง หลังจากทำการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1120°C พบว่าการขึ้นรูปโดยใช้วิธีการเทแบบ slip-cast นั้นจะช่วยให้อนุภาคของอะลูมินาที่เติมลงไปเรียงตัวกันได้อย่างหนาแน่นดีกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ tape-cast ดังแสดงในรูป 2.6 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอัตราส่วนโดยมวลของปริมาณอะลูมินาต่อปริมาณรวมของอะลูมินากับสารยึดเหนี่ยว (binder) ซึ่งถูกแทนด้วย $a/(a+o)$ โดยกำหนดให้อัตราส่วนโดยมวลของปริมาณสารยึดเหนี่ยวต่อปริมาณรวมของสารยึดเหนี่ยวกับสารเพิ่มความเหนียวมีค่าเป็น 0.44 ซึ่งจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงและค่าความต้านทานต่อรอยแตกของชิ้นงาน ดังแสดงในรูป 2.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงและค่าความต้านทานของชิ้นงานจะ

เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วน $a/(a+o)$ และจะเริ่มคงที่เมื่อปริมาณของอัตราส่วนโดยมวลของปริมาณอะลูมินาต่อปริมาณรวมของอะลูมินากับสารยึดเหนี่ยวมีค่าประมาณ 0.83 โดยชิ้นงานจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ประมาณ 508 MPa และมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกสูงสุดที่ประมาณ $3.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

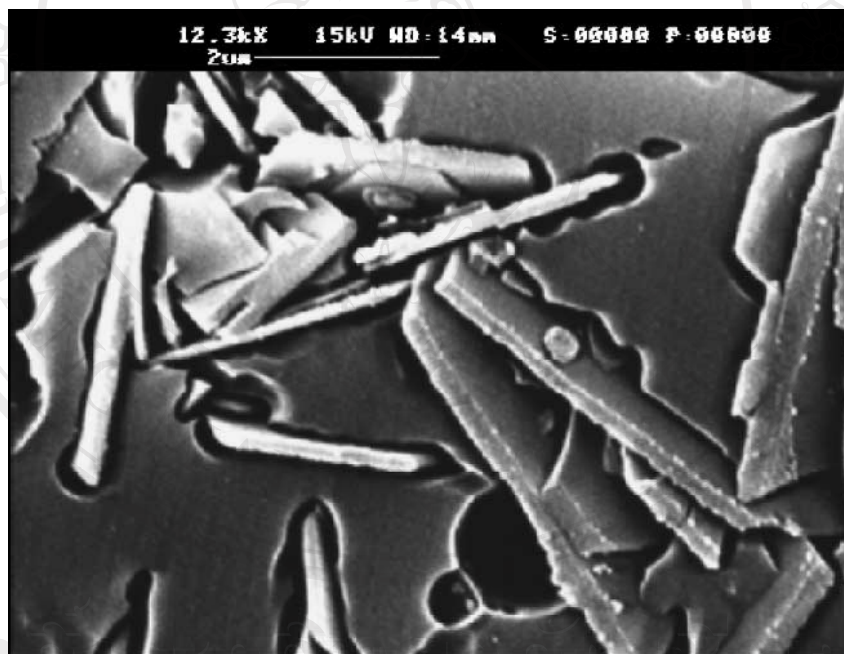


รูป 2.6 ภาพถ่าย SEM แสดงการเรียงตัวของอะลูมินาในพลาสติกที่เป็นแก้วของพอร์ซเลนเซรามิกซึ่งขึ้นรูปโดยวิธี (a) tape-cast และ (b) slip-cast [29]

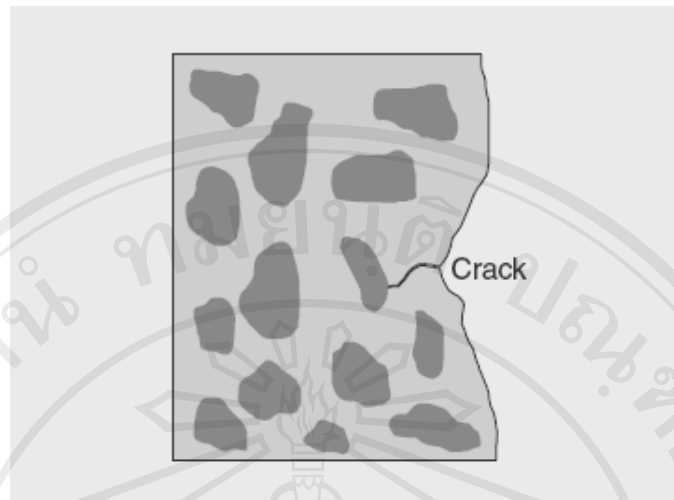


รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยมวลของปริมาณอะลูมินาต่อปริมาณรวมของอะลูมินากับสารยึดเหนี่ยว ($a/(a+o)$) กับค่าความแข็งแรงและค่าความต้านทานต่อรอยแตกของพอร์ซเลนเซรามิกที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการ casting [29]

ต่อมา Bernado และ Scarinci [30] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและพฤติกรรมการขึ้นเทอร์ของแก้วที่เสริมแรงด้วยอะลูมินา โดยทำการเติมอะลูมินาร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยปริมาตรลงไป หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปไปเผาขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เติมอะลูมินาร้อยละ 15 โดยปริมาตรลงไปในนั้นมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (จาก 77.79 เป็น 122.19 MPa) เนื่องจากการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคอะลูมินาในเนื้อแก้ว ดังรูป 2.8 และการลดความเค้นตกค้าง (residual stress) อันเนื่องมาจากความไม่พอเหมาะกันของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนของสารตั้งต้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านทานต่อรอยแตกก็เพิ่มมากขึ้นเพราะสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่มีเฟสเสริมแรงช่วยในการยับยั้งรอยแตก แสดงดังรูป 2.9

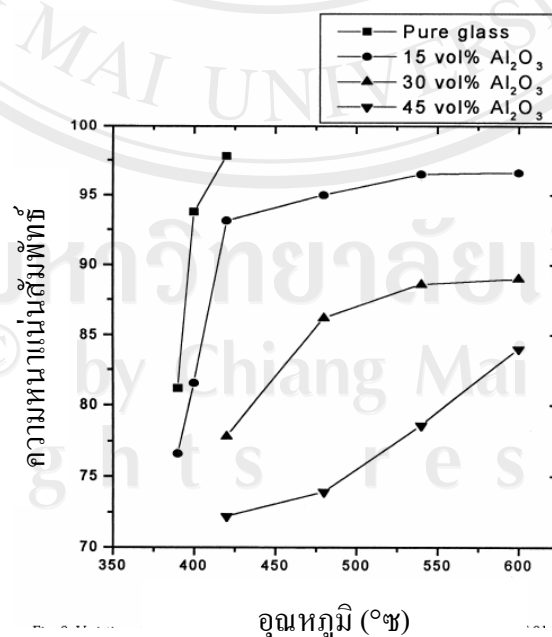


รูป 2.8 ภาพถ่าย SEM ผิวหน้าของชิ้นงานแก้วที่เสริมแรงด้วยอะลูมินา (ร้อยละ 15 โดยปริมาตร) ที่ผ่านการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) [30]



รูป 2.9 กลไกการยับยั้งรอยแตกของอนุภาคอะลูมินาที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อแก้ว [3]

จากนั้น Ray และ Tiwari [31] ได้ทำการศึกษาผลของอนุภาคอะลูมินาที่มีต่อพฤติกรรมการเผาชินเทอร์ โดยทำการเติมอนุภาคอะลูมินาขนาด 3.3 ไมครอน ลงไปในเนื้อแก้ว พบว่าที่การเติมอะลูมินาร้อยละ 15 โดยปริมาตร เป็นปริมาณที่เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากทำให้เนื้อแก้วมีความหนาแน่นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมอะลูมินาสีอื่น ๆ ที่อุณหภูมิเท่ากัน และอนุภาคของอะลูมินาที่มากกว่าร้อยละ 15 โดยปริมาตรจะเข้าไปขัดขวางกระบวนการชินเทอร์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูพรุนมากและความหนาแน่นต่ำ ดังรูป 2.10

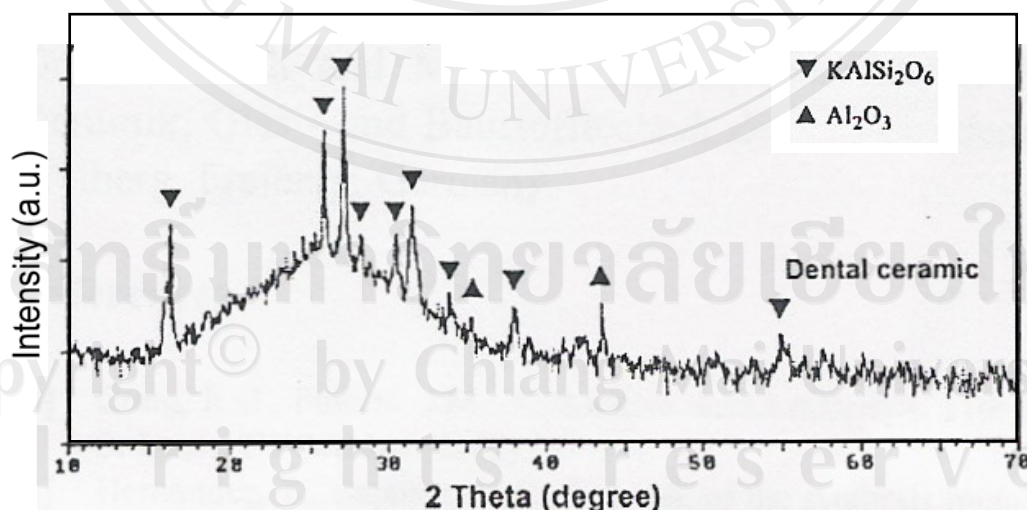


รูป 2.10 ความแปรผันของความหนาแน่นของเนื้อแก้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ [31]

ในปี ค.ศ. 2005 Bernardo และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาการเสริมแรงแก้วด้วยผงขัดอะลูมินา (แอลฟาอะลูมินา) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นรูปหกเหลี่ยม ขนาดระหว่าง 5 ถึง 10 ไมครอน ความหนาแน่น 3.99 g/cm^3 พบว่าอัตราส่วนผสมร้อยละ 15 โดยปริมาตรของอะลูมินา ทำให้วัสดุคอมโพสิตนี้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเนื้อแก้วที่ไม่มีการเสริมแรง นอกจากนี้ยังพบอีกว่ารูพรุนมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงขัดอะลูมินา

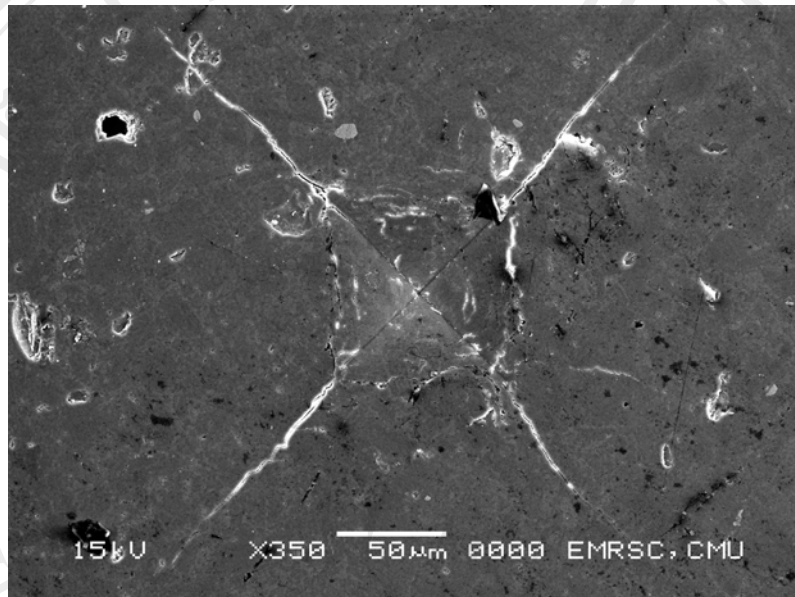
นอกจากปริมาณของอะลูมินาที่เติมลงไปจะมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตแล้ว ขนาดของอนุภาคอะลูมินาก็มีความสำคัญเช่นกัน Teng [33] อนุภาคอะลูมินาที่มีขนาดอยู่ในเรือนนาโน (39.1 นาโนเมตร) ซึ่งกระจายได้ดีในเนื้อเซรามิก ทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นสูงขึ้น และมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับเซรามิกที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดไมครอน ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดอนุภาคของอะลูมินาที่เล็กลง การเสริมแรงด้วยขอบเขตเกรน (grain boundary reinforcement) และการแตกแบบผ่านเกรน (transgranular fracture mode)

ในปี ค.ศ. 2006 อรรถวิทย์และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของเซรามิกทันตกรรมที่เสริมแรงด้วยอะลูมินาขนาดนาโนที่มีรูปร่างต่าง ๆ กัน โดยเริ่มต้นจากการศึกษาเฟสที่เป็นผลึกของผงพอร์ซเลนก่อนที่จะเติมอะลูมินาลงไปด้วยเทคนิค XRD พบว่าในผงพอร์ซเลนนั้นมีแก้วเป็นเฟสหลักและมีเฟสที่เป็นผลึกปนอยู่บ้างเล็กน้อย ดังรูป 2.11 โดยฟลักของผลึกที่แสดงคือ KAlSi_2O_6 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงพอร์ซเลนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1



รูป 2.11 XRD pattern ของผงพอร์ซเลนทันตกรรม [34]

และยังพบว่าสมบัติทางกลที่สำคัญของพอร์ซเลนเซรามิกมีแนวโน้มดีขึ้นอย่างมาก กล่าวคือ มีความทนแรงคดโค้ง (flexural strength) เพิ่มขึ้น 42.8 – 97.8 % ความต้านทานต่อรอยแตกเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.49 – 1.76 เป็น 1.84 – 2.31 MPa.m^{1/2} โดยเฉพาะอะลูมินาที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยเพราะจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของรอยแตก



รูป 2.12 รอยแตกจากหัวกดแบบวิกเกอร์ [34]

จากรูป 2.12 แสดงให้เห็นว่ารอยแตกเคลื่อนที่ไปตามเฟสที่เป็นแก้ว โดยไม่ผ่านผลึกอะลูมินา เนื่องจากอะลูมินามีความแข็งแรงสูง ทำให้รอยแตกไม่เป็นไปในแนวเส้นตรง แต่จะโค้งไปตามแนวขอบเกรนของอะลูมินา ซึ่งคาดว่ากลไกนี้ช่วยให้เซรามิกมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาผลงานทางวิชาการที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกคอมโพสิตอยู่พอสมควร ซึ่งในเนื้อหาของงานวิจัยส่วนมากก็จะกล่าวถึงการเติมอนุภาคอะลูมินาลงไปเพื่อพัฒนาสมบัติทางกลให้ดีขึ้น ในขณะที่การศึกษาสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิตอย่างเป็นระบบนั้นยังมีรายงานออกมาไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งความสนใจไปที่ประเด็นดังกล่าว