บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

พอร์ซเลนคือ เซรามิกชนิดหนึ่งที่มีดินขาว (kaolin, clay) เป็นองค์ประกอบ มีใช้กันอย่างกว้างขวางมาเกือบ 3,000 ปี โดยถือกำเนิดขึ้นในประเทศจีน โดยในช่วงต้นศตวรรษที่ 17 ในยุโรปมีการพัฒนาพอร์ซเลนให้มีสีสันและความโปร่งแสง ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการนำมาใช้ในงานทางทันตกรรม ต่อมาในช่วงกลางศตวรรษที่ 18 Fauchard และคณะ ได้นำพอร์ซเลนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนฟันที่สูญเสียไป แต่ไม่ประสบความสำเร็จ จนกระทั่งปี ค.ศ.1880 เริ่มประสบความสำเร็จจากการทำครอบฟันพอร์ซเลนแจ็คเก็ต (porcelain jacket crown) (Binns,1983)

พอร์ซเลนทั่วไปมีองค์ประกอบหลักคือ ดินขาว และองค์ประกอบอื่นคือ ควอทซ์หรือซิลิกา (quartz or silica) และเฟลด์สปาร์ (feldspar) โดยนำมาบดเป็นผงละเอียดผสมรวมกันแล้วจึงนำไปขึ้นรูปโดยการเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิสูง ภายหลังการเผาจะได้เป็นผลิตภัณฑ์สีขาว (whiteware) ดังนั้นพอร์ซเลนจึงหมายถึง ผลิตภัณฑ์สีขาวที่มีความแข็งแรงสูงและโปร่งแสง ส่วนพอร์ซเลทางทันตกรรมมีความแตกต่างจากพอร์ซเลนทั่วไปที่ใช้ทำเครื่องครัวหรือเครื่องสุขภัณฑ์คือ มีส่วนประกอบหลักเป็นเฟลด์สปาร์มากถึงร้อยละ 65 และมีองค์ประกอบอื่นเป็นซิลิกาหรือควอตซ์ และสารเติมสี (pigments) ต่างๆ และมีดินขาวในปริมาณที่น้อยมาก เพราะต้องการให้พอร์ซเลนโปร่งแสงมากขึ้น (van Noort, 1994; McCabe, 1990)

เฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพอร์ซเลนคือ มีส่วนประกอบของอะลูมิโนซิลิเกตของโซเดียม และ/หรือโพแทสเซียม (potassium aluminium silicate, $K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$) และ/หรือ (sodium aluminium silicate, $Na_2O.Al_2O_3.6SiO_2$) เมื่อนำไปเผาถึงจุดหลอมเหลวจะมีลักษณะคล้ายแก้ว และแม้จะเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นอีก ยังสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ (Anusavice, 1996)

นอกจากนี้ พอร์ซเลนมีแนวโน้มที่จะเกิดการหดตัวภายหลังขบวนการซินเทอร์ริง (sintering) เนื่องจากมีการสูญเสียน้ำในการทำให้แห้งและอัดแน่น ทำให้เกิดการหดตัวเชิงปริมาตร (volumetric shrinkage) ถึงร้อยละ 30-40 (Combe, 1986) เพื่อให้ได้ขนาดภายหลังการเผาตามต้องการจำเป็นต้องชดเชยโดยการทำพอร์ซเลนให้มีขนาดใหญ่กว่าเดิมเพื่อชดเชยการหดตัว และพบว่าการเผาพอร์ซเลนภายใต้สูญญากาศจะลดการเกิดรูพรุนในเนื้อพอร์ซเลนจากร้อยละ 4.6 เหลือเพียงร้อยละ 0.5 มีผลทำให้การหดตัวภายหลังการเผาลดลง (McCabe, 1990)

เนื่องจากพอร์ซเลนมีการนำความร้อนที่ต่ำ เมื่อเผาหลอมพอร์ซเลนแล้วนำออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง พบว่าพื้นผิวภายนอกของพอร์ซเลนจะเย็นตัวลงได้เร็วกว่าพื้นผิวภายใน และหดตัวมากกว่า

ซึ่งทำให้เกิดแรงอัด (compressive load) ที่บริเวณผิวภายนอก และเกิดความเค้นตกค้างแบบดึง (residual tensile stresses) ที่ผิวภายใน แล้วถ้ามีการเปลี่ยนแปลงทางมิติที่มากพอขึ้น จะทำให้พื้นผิวภายในที่อยู่ภายใต้แรงดึง (tension) แตกแยกออกจากกัน เพื่อชดเชยความเค้นให้ลดลง ดังนั้นพื้นผิวภายในของพอร์ซเลนจะเกิดเป็นรอยแตกขนาดเล็ก (Griffth's flaw) ขึ้นมากมาย ซึ่งมีการสะสมของความเค้นที่ปลายของรอยแตก เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้รอยแตกดำเนินต่อไป (crack propagation) อันเป็นสาเหตุทำให้พอร์ซเลนแตกหักได้โดยง่าย (Yamamoto, 1985)

ดังนั้น การเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอร์ซเลนจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ในปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยการแทนที่ของไอออนที่มีขนาดใหญ่แทนที่ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่า ทำให้เกิดเบียดแน่นหรือความเค้นแบบอัดที่พื้นผิวของพอร์ซเลน (Southan, 1970; Dunn, *et al.*,1977) การทำให้วัสดุเย็นตัวลงอย่างฉับพลันจากอุณหภูมิการเผาที่สูง (thermal tempering) (Anusavice and Gray,1989; Anusavice,1991) การใช้วัสดุสองชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่แตกต่างกัน (thermal expansion coefficiency mismatch) วิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดความเค้นแบบอัดตกค้างที่พื้นผิวของพอร์ซเลน นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นคือ การใส่วัสดุที่มีลักษณะเป็นผลึกผง (dispersion of a crystalline phase) ให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอร์ซเลนเพื่อดูดซับแรงที่จะทำให้รอยแตกดำเนินต่อไป เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) (MaLean and Hughess, 1965) และการใส่ผลึกที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกโดยการดึงพลังงานจากความเค้นที่ได้รับ เช่น ผลึก PSZ (partially stabilized zirconia) (transformation toughening) (Anusavice, 1996)

นอกจากนี้ ยังมีวิธีเสริมความแข็งแรงให้กับพอร์ซเลน โดยความพยายามในการนำพอร์ซเลนมาเคลือบทับอยู่บนโลหะ ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงต้นของศตวรรษที่ 20 แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากมีปัญหาความแตกต่างกันมากของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนและโลหะที่เป็นโครงสร้างภายใน ในขณะนั้นเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงภายหลังการเผา พอร์ซเลนแตก เกิดการหดตัวที่แตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนมีค่าเท่ากับ 5.5-7.5 X 10^{-6}/ ^{0}ซ ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะมีค่าเท่ากับ 13.5-15.5 X 10^{-6}/ ^{0}ซ ต่อมาความพยายามนี้ได้ประสบความสำเร็จในปี 1962 โดย Weinstein และคณะ โดยการเติมโปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ 11-15 ซึ่งเมื่อผ่านขบวนการเผาจะก่อให้เกิดผลึกลูไซต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนมีค่าสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับโลหะ จึงสามารถนำพอร์ซเลนมาเคลือบทับบนโลหะได้เป็นครั้งแรก (Binns, 1983)

การนำพอร์ซเลนมาเคลือบทับบนโลหะนั้น สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอร์ซเลนได้ โดยอาศัยโครงสร้างของโลหะที่อยู่ภายในที่มีความแข็งตึงช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยโลหะทำหน้าที่ป้องกันและกระจายแรงในเนื้อพอร์ซเลน ลดการเกิดความเค้นแบบดึงที่จะทำให้รอยแตกเล็กๆ บริเวณพื้นผิวนั้นดำเนินต่อไป รวมถึงวิธีการทำให้เกิดแรงเค้นแบบอัดตกค้างที่พื้นผิวของพอร์ซเลน ซึ่งเกิดจากการใช้วัสดุ

สองชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่แตกต่างกันของพอร์ซเลนและโลหะเพียงเล็กน้อย แล้วทำให้วัสดุเย็นตัวลงจากอุณหภูมิการเผาที่สูง ชั้นโลหะซึ่งเย็นตัวเร็วกว่าจะเกิดการหดตัวได้เร็วกว่าชั้นพอร์ซเลน จะทำให้เกิดแรงเค้นแบบอัดตกค้างที่รอยต่อของผิวของพอร์ซเลนกับโลหะ

จากการศึกษาของ Yamamoto (1985) โดยนำแผ่นโลหะเหวี่ยงที่มีขนาด 6 X 15 X 0.3 มิลลิเมตร นำมาเคลือบทับด้วยพอร์ซเลนทึบแสงสองชั้น และพอร์ซเลนเนื้อฟัน โดยให้มีความหนารวมเท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยตลอด แล้วนำไปเคลือบเงา พบว่าแผ่นโลหะเหวี่ยงที่มีความหนาเพียง 0.3 มิลลิเมตร โดยปกติจะอ่อนมากสามารถใช้นิ้วมืองอได้โดยง่าย แต่เมื่อนำมาเคลือบทับด้วยพอร์ซเลนที่มีความหนา 0.7 มิลลิเมตร ซึ่งมีความเปราะโดยธรรมชาติอยู่แล้ว กลับทำให้แผ่นโลหะเคลือบทับพอร์ซเลนมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จนไม่สามารถใช้นิ้วมืองอได้ และเมื่อนำแผ่นโลหะเคลือบด้วยพอร์ซเลนไปทดสอบหาค่ากำลังดัดขวาง โดยให้พอร์ซเลนอยู่ด้านแรงดึงสูงสุด แล้วใช้วิธีแรงกดสามตำแหน่ง คือ มีแรงกดลงตรงกลางชิ้นงาน ส่วนปลายทั้งสองข้างจะถูกรองรับไว้ ทำให้บริเวณผิวพอร์ซเลนที่รับแรงกดจะเกิดบริเวณแบบอัด (compressive zone) ส่วนผิวพอร์ซเลนอีกด้านที่ติดกับโลหะจะเกิดบริเวณแบบดึง (tension zone) ขึ้น ผลปรากฏว่าทำให้สามารถรับแรงได้มากถึง 250 นิวตัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าแผ่นโลหะเคลือบด้วยพอร์ซเลนนั้นสามารถงอได้บ้างโดยไม่ทำให้เนื้อพอร์ซเลนแตกหัก ทั้งที่ปกติแล้วพอร์ซเลนมีความเปราะสูง สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการนำแผ่นโลหะมาเคลือบด้วยพอร์ซเลน นอกจากจะช่วยเพิ่มความแข็งให้กับระบบแล้ว ยังสามารถช่วยลดความเปราะในตัวของพอร์ซเลนได้

และมีการศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลนกับการบูรณะฟันด้วยพอร์ซเลนแบบทั้งหมดสามชนิดคือ กลาสเซรามิก (ไดคอร์) (glass-ceramic, Dicor®) อลูมินัสคอร์พอร์ซเลน (ไฮซีแรม) (aluminous-core porcelain, Hi-Ceram®) กลาสอินฟิวเตรดอลูมินัสคอร์พอร์ซเลน (อินซีแรม) (glass-infiltrated aluminous-core porcelain, In-Ceram®) จากการศึกษาของ Castellani และคณะ (1994) โดยใช้เครื่องมือที่ควบคุมรูปร่างมิติหรือความหนาของตัวอย่างครอบฟันแต่ละชนิดที่ออกแบบจากมหาวิทยาลัยมิชิแกนคือ ใช้แม่แบบของหลักยึดที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดประมาณฟันกรามน้อย แล้วทำช่องให้มีความหนาคงที่ 0.5 มิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างภายในและครอบฟันมีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการผลิตครอบฟันแต่ละชนิด แล้วนำมาทดสอบการความต้านทานต่อการแตกหัก โดยใช้เครื่องทดสอบสากล (Instron, Canton, MA) ที่มีอัตราเร็วของหัวกด (crosshead speed) 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้แผ่นทองแดงวางข้างบานและข้างใต้ของครอบฟันขณะทดสอบแล้วใช้แรงกดและวัดการแตกหักตามรูปแบบการทดลองของ Hondrum และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และใช้การทดสอบแบบที เปรียบเทียบเป็นคู่ๆ โดยใช้ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) พบว่าการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลนมีความต้านทานต่อการแตกหักสูงกว่าไดคอร์ และไฮซีแรม อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.001$) แต่ไม่

มีความแตกต่างกับอินซีแรม ($p>0.05$) และพบว่าการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลน จะเกิดการแตกหักเพียงส่วนของชั้นพอร์ซเลน ขณะที่การบูรณะฟันด้วยพอร์ซเลนแบบทั้งหมดเกิดการแตกหักทั้งชิ้น (global fracture) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลนยังเป็นการบูรณะฟันที่ได้รับความน่าเชื่อถือถึงความแข็งแรง

การบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลนจะอาศัยการหลอมตัวของพอร์ซเลนให้เชื่อมกับโลหะที่เป็นโครงสร้างภายใน ณ อุณหภูมิสูง ดังนั้นพอร์เลนและโลหะจำเป็นต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่เหมาะสมกัน เพื่อป้องกันความเค้นชั่วคราวหรือความเค้นตกค้างอยู่ภายในเนื้อพอร์ซเลน หลังจากปล่อยให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิเผาที่สูงลงสู่อุณหภูมิห้อง ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำให้เกิดรอยร้าว การราน หรือการเป็นลายขึ้นในเนื้อพอร์ซเลนได้ ซึ่งการเกิดนี้จะไม่เกิดทันทีทันใด อาจเกิดขึ้นหลังจากการบูรณะฟันแล้วเป็นเวลาหลายเดือนต่อมา (Anusavice, *et al.*,1988; Anusavice and Gray,1989)

และเมื่อพิจารณาการขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะ พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงคือ ช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงช่วงที่มีการหลอมเหลว ส่วนพอร์ซเลนจะมีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ (Anusavice,1996) มีการศึกษาของ Prasad และ คณะ (1988) ที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะจะค่อนข้างแน่นอน คือเมื่อทำการเผาหลายๆ ครั้งหรือให้ความร้อน แล้วทำให้เย็นตัวลงจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน แต่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนมีการเปลี่ยนแปลง โดยขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวลงจากอุณหภูมิการก่อตัวของพอร์ซเลนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียสและขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการเผาและการเกิดปฏิกิริยาเคมีของพอร์ซเลน โดยทำการทดสอบความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่เหมาะสมกันระหว่างพอร์ซเลนและโลหะผสม (porcelain-alloy compatibility test, PACT) โดยใช้ตัวทดสอบ (test fixtures) สองแบบคือ ตัวทดสอบสำหรับฟันหน้าที่เป็นหลักยึดหรือฟันแขวน และตัวทดสอบสำหรับฟันหลังที่เป็นฟันแขวน และทำการเผาชิ้นทดสอบตามตารางที่กำหนด พบว่าการทำให้พอร์ซเลนเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ของการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลนจากอุณหภูมิการเผาที่สูงจนถึงประมาณ 700 องศาเซลเซียส จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนและอาจทำให้เกิดความไม่เหมาะสมกับโลหะที่เป็นโครงสร้างภายใน

ดังนั้นผลของค่าการขยายตัวเหตุความร้อนที่แตกต่างของพอร์ซเลนและโลหะที่เป็นโครงสร้างอยู่ภายในจึงมีความน่าสนใจคือ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหตุความร้อนของพอร์ซเลนมากกว่าโลหะ เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิที่เหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะแก้ว (glass transition temperature, Tg) แล้ว พอร์ซเลนจะหดตัวมากกว่าโลหะ ทำให้เกิดความเค้นแบบอัดเข้าสู่ศูนย์กลาง (radial compressive stresses) ตั้งฉากกับรอยต่อของผิวโลหะกับพอร์ซเลนและเกิดความเค้นแบบดึงบริเวณผิวรอบนอก (tangential tensile stresses) ขนานกับรอยต่อของผิวโลหะกับ

พอร์ซเลน ซึ่งพบว่าถ้าความเค้นเกิดมากพอจะพบรอยแตกเข้าสู่ศูนย์กลางในส่วนของพอร์ซเลนตั้งฉากกับผิวรอยต่อของผิวโลหะกับพอร์ซเลน (Mackert ,1988)

แต่ในสภาพที่ตรงกันข้ามกัน ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะมากกว่าพอร์ซเลน เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิที่เหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะแก้ว โลหะจะหดตัวมากกว่าพอร์ซเลนทำให้เกิดความเค้นแบบดึงเข้าสู่ศูนย์กลาง และเกิดความเค้นแบบอัดบริเวณผิวรอบนอก การเกิดความเค้นแบบอัดนี้ถือว่าเป็นข้อดี ถ้าพอร์ซเลนและโลหะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่ใกล้เคียงกัน การเกิดความเค้นแบบอัดบริเวณผิวรอบนอกจะมีแนวโน้มช่วยยับยั้งการดำเนินต่อของรอยแตก ที่เกิดบริเวณผิวของพอร์ซเลนเข้าสู่โลหะ แต่ถ้าโลหะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนมากกว่าพอร์ซเลนมาก จะก่อให้เกิดความเค้นแบบดึงเข้าสู่ศูนย์กลาง สามารถทำให้รอยแตกดำเนินแบบขนานกับรอยต่อของผิวโลหะกับพอร์ซเลนได้ (Mackert, 1988)

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่เหมาะสมกันของพอร์ซเลนกับโลหะที่เป็นโครงสร้างภายในคือ โลหะควรมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนมากกว่าพอร์ซเลนเพียงเล็กน้อยคือ ประมาณ 0.5-1.0 x 10^{-6}/ ^{0}ซ เพื่อทำให้โลหะมีการหดตัวมากกว่าพอร์ซเลนเพียงเล็กน้อยเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิการเผาที่สูงลงสู่อุณหภูมิห้อง การเกิดความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนนี้จะทำให้เกิดความเค้นแบบอัดในแนวรอบแกน (axial) หรือแบบโดยรอบ (hoop) และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานบูรณะชนิดนี้ได้ (Anusavice, *et al.*, 1988; Coffey, *et al.*, 1988; Anusavice, 1995)

ก่อนปี ค.ศ. 1960 พอร์ซเลนทางทันตกรรมที่นิยมใช้และมีจุดหลอมตัวสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนเท่ากับ 7.5 x 10^{-6}/ ^{0}ซ ไม่เหมาะที่จะนำมาเคลือบทับบนโลหะผสมที่เป็นโครงสร้างภายในของการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลน เพราะค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะสำหรับพอร์ซเลนมีค่าเท่ากับ 14-15 x 10^{-6}/ ^{0}ซ จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงชนิดของพอร์ซเลนจนประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรกโดย Weinstein และคณะในปี 1962 และจดเป็นสิทธิบัตร คือ Component No.1 เป็นแก้วเฟลด์สปาร์ (crystallized feldspathic glasses) ที่มีผลึกลูไซต์ (leucite) ฝังตัวอยู่ภายในคือ พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ (feldspathic porcelain) (Mackert, *et al.*, 1986)

จากที่กล่าวมาแล้วว่า พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แก้วเฟลด์สปาร์ที่มีผลึกลูไซต์ฝังตัวอยู่ภายใน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของแก้วเมทริกซ์น้อยกว่า 10 x 10^{-6}/ ^{0}ซ การศึกษาของ Vergano และคณะ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของแก้วเมทริกซ์เท่ากับ 6.6 x 10^{-6}/ ^{0}ซ ดังนั้นผลึกลูไซต์จึงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนมากกว่าแก้วเมทริกซ์ และมีการศึกษาหลายการศึกษาที่สนับสนุนว่า การเปลี่ยนแปลงของผลึกลูไซต์มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน (Smyth and Schulman,1981; Mackert and Evan,1991a)

ผลึกลูไซต์มีระยะผลึก (crystal phases) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนเท่ากับ 20-25 x 10^{-6}/ ^{0}ซ เมื่อเผาพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์จนถึงอุณหภูมิระหว่าง 1150 และ 1530 องศาเซลเซียส จะเกิดการละลายตัวไม่สม่ำเสมอ (incongruent melting) ทำให้เกิดเป็นผลึกลูไซต์ฝังตัวอยู่ในแก้วที่หลอมเหลว (liquid glass) การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้จะช่วยการยึดติด (bonding) ของพอร์ซเลนกับโลหะ (Mackert, *et al.*, 1986a; 1986b; 1995)

ดังนั้นลูไซต์จึงน่าจะเป็นผลึกที่มีความสำคัญต่อค่าการขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน โดยพบว่าจำนวน ขนาดของผลึกโดยเฉลี่ยและโครงสร้างของผลึกมีผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนและกลศาสตร์ของวัสดุโดยตรง (Dong, *et al.*, 1992)

การศึกษาของ Mackert และคณะ (1986a; 1986b) โดยใช้วิธีการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์ที่อุณหภูมิสูง (high-temperature x-ray diffraction, XRD) พบว่าลูไซต์เป็นวัฏภาคผลึกที่ไม่สมดุลย์ เมื่อให้ความร้อนหรือเผาพอร์ซเลนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค (displacive transformation) ของลูไซต์จากรูปร่างเตตราโกนอล ณ อุณหภูมิห้องไปเป็นรูปร่างคิวบิก (cubic) อย่างสมบูรณ์ ณ อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ในการศึกษาพบว่า ณ อุณหภูมิห้องจะเกิดแต่ลูไซต์รูปร่างเตตราโกนอล แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึง 400 องศาเซลเซียส ปรากฏยอดแหลมของกราฟขึ้นใหม่ ซึ่งแสดงการเกิดของลูไซต์รูปร่างคิวบิกขึ้นนั้น เป็นการเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคแล้วเมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกจนถึง 500 องศาเซลเซียส พบว่า ยอดแหลมของกราฟลูไซต์คิวบิกมีความสูงประมาณ 85% ของยอดแหลมของกราฟ ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งสองอุณหภูมิมียอดแหลมของกราฟคิวบิกที่สูงที่สุดและมีค่าเท่ากัน รวมทั้งเป็นการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคอย่างสมบูรณ์ด้วย

นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังศึกษาถึงพฤติกรรมการขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน Component No.1 โดยวิธีวัดความแตกต่างของการขยายตัว (differential dilatometry) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าการขยายตัวเหตุความร้อนสูงในช่วงของอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของหน่วยเซลลูไซต์ (volume of leucite unit cell) เท่ากับร้อยละ1.2 ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเตตราโกนอลไปเป็นคิวบิกของผลึกลูไซต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของผลึก (crystalline phase) ของลูไซต์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่เหมาะสมกับโลหะที่เป็นโครงสร้างอยู่ภายในแล้วก่อให้เกิดความเสียหายต่อพอร์ซเลนได้

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Denry และคณะ (1996) แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของผลึกลูไซต์ โดยการทำให้ผลึกลูไซต์คงสภาพ (stabilized) ที่วัฏภาครูปร่างคิวบิกณ อุณหภูมิห้อง พบว่าค่ากำลังดัดขวางเฉลี่ย (mean biaxial flexural strength) ลดลงมากกว่ากลุ่มของ

ลูไซต์ที่มีวัฏภาครูปร่างเตตราโกนอล เพราะมีความเค้นแบบอัดที่พื้นผิวต่ำกว่า อันเนื่องจากขาดการเปลี่ยนแปลงระยะวัฏภาคของผลึกจากระยะที่มีรูปร่างคิวบิกกลับไปเป็นเตตราโกนอล จึงไม่เกิดการหดตัวร้อยละ1.2 ของปริมาตร ขณะเย็นตัวลง และอีกเหตุผลหนึ่งคือ เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของลูไซต์รูปร่างคิวบิกมีค่าต่ำคือ เท่ากับ 11.7 ถึง 12.8 x 10^{-6}/ ^{0}ซ มีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของลูไซต์รูปร่างเตตราโกนอลซึ่งเท่ากับ 22 x 10^{-6}/ ^{0}ซ เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงระยะวัฏภาคของผลึกลูไซต์จึงมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ เพราะมีผลต่อการทำให้เกิดความเค้นแบบอัดที่ผิวรอบๆ ผลึกลูไซต์

เนื่องจากพอร์ซเลนทางทันตกรรมประกอบด้วย วัฏภาคผลึกชนิดเดียว หรือหลายชนิด และวัฏภาคของส่วนที่เป็นแก้ว ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ซเลน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของส่วนประกอบที่เป็นวัฏภาคเหล่านี้ มีการศึกษาถึงการเกิดของผลึกลูไซต์มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ซเลน เช่น ความโปร่งแสง และการขยายตัวเหตุความร้อน โดยใช้พอร์ซเลนสามชนิดคือ Ceramco Vita และ Biobond แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์ และการตรวจสอบดูผิวที่ขัดมันด้วยเครื่องพีโธกราฟฟิกไมโครสโครป ซึ่งแสดงการเกิดของผลึกลูไซต์ และมีค่าของการขยายตัวเหตุความร้อนเท่ากับ 31.0 x 10^{-6}/ ^{0}ซ ซึ่งส่งผลทำให้พอร์ซเลนสำหรับทางทันตกรรมมีค่าการขยายตัวเหตุความร้อนที่สูง และเกิดความเหมาะสมกับโลหะที่เป็นโครงสร้างภายใน และนอกจากนี้ผลึกลูไซต์ยังมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ซเลนด้วย เช่น ความโปร่งแสง พบว่าค่าดรรชนีการหักเหแสงของผลึกลูไซต์มีค่าเท่ากับ 1.51 ซึ่งเกือบเท่ากับค่าของส่วนที่เป็นแก้ว ทำให้พอร์ซเลนมีโปร่งแสงเพียงพอสำหรับการบูรณะฟันที่ต้องการความโปร่งแสงของวัสดุเพื่อทำให้มีความคล้ายคลึงกับฟันธรรมชาติ (Smyth and Schulman, 1981) แต่พอร์ซเลนทั้ง 3 ชนิดนี้ไม่มีการผลิตในปัจจุบัน

นอกจากนี้ ค่าความโปร่งแสงของพอร์ซเลนยังขึ้นอยู่กับการเกิดรูพรุนของพอร์ซเลนที่ยังไม่เผา ซึ่งเกิดจากความหนืดของการผสม (consistency of mix) การทำให้เกิดการอัดแน่น (condensation) การควบคุมความชื้น และขึ้นอยู่กับการกำจัดอากาศออกระหว่างขบวนการเผาหลอมพอร์ซเลน (sintering) ระยะเวลาหน้าเตาเผา (predrying time) อุณหภูมิในการเผา (firing temperature) และคุณภาพของเครื่องความดันสูญญากาศ (vacuum quality) (Chiche and Pinault, 1988)

เนื่องจากลักษณะและปริมาณของผลึก (วัฏภาค) มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ดังที่กล่าวมาแล้ว กรรมวิธีการกระทำอันมีผลต่อการเกิดผลึกลูไซต์ เช่น ภาวะการเย็นตัวของพอร์ซเลนภายหลังการเผาจะเป็นแบบรวดเร็ว หรือแบบช้า ก็น่าจะเป็นสิ่งที่ควรศึกษา

Mackert และ Evans (1991b) ได้ศึกษาผลการเย็นตัวลงของพอร์ซเลน โดยวิธีการวิเคราะห์การกระเจิงของรังสีเอกซเรย์เชิงปริมาณ (quantitative x-ray diffraction) ของผลึกลูไซต์ โดยใช้พอร์ซเลนที่นิยม 6 ชนิด และ Component No.1 ของ Weinstein (1962) และ Weinstein และคณะ (1962) และจดเป็นสิทธิบัตร โดยศึกษาวิธีการทำให้เย็นตัว 2 แบบคือ การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยนำออกจาก

เตาเผาทันที กับการทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ในเตาเผาโดยการปิดเตา แล้วทำวิเคราะห์โดยใช้มาตรฐานที่มีสัดส่วนของปริมาตรลูไซต์ (leucite volume fraction) คือ 0.111 , 0.223 , 0.334 และ 0.445 จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ การทดสอบทีแบบทิศทางเดียว (unpaired , one-tailed t tests) พบว่ามีการเพิ่มจำนวนของลูไซต์ของกลุ่มที่ทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ มากกว่ากลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ($p < 0.05$) การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนโดยปริมาตรของลูไซต์จากการทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ อยู่ในช่วงร้อยละ 8.5 ถึง 55.8 โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 26.9 ซึ่งสัดส่วนโดยปริมาตรของลูไซต์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน แล้วทำให้เกิดความไม่เหมาะสมกับโลหะที่ใช้ในการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลน แต่การศึกษานี้เป็นการศึกษาของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ในสมัยนั้น ซึ่งในปัจจุบันมีการปรับประยุกต์พอร์ซเลนบางตัว หรือพอร์ซเลนมีการพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น มีความหลากหลายมากขึ้น จึงมีความแตกต่างกัน ทำให้ยังขาดข้อเท็จจริงในเรื่องนี้ และการทดลองนี้ยังไม่มีส่วนที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเมื่อมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนมากขึ้น

แต่มีการศึกษาที่ให้ผลที่แตกต่างกันเป็นการศึกษาของ Mackert และคณะ (1996) ถึงการเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อนและการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ของพอร์ซเลนที่นิยมในสมัยนั้น 6 ชนิด และ Component No.1 ของ Weinstein และคณะ (1962) ด้วยเครื่องวัดการขยายตัว (dilatometer) ที่ต่อเชื่อมด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระเจิงของรังสีเอกซเรย์เชิงปริมาณ โดยใช้ลูไซต์มาตรฐานที่ได้เตรียมไว้ก่อน โดยมีอะลูมินาเป็นตัวมาตรฐานภายใน (internal standard) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการเกิดผลึกลูไซต์ และความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน ซึ่งผลการศึกษา พบว่าการทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า โดยการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้เครื่องวัดการขยายตัวจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่มีการหลอมตัวของพอร์ซเลน พบการเพิ่มขึ้นของผลึกลูไซต์เพียงเล็กน้อยซึ่งเท่ากับ 0.004 ของสัดส่วนโดยน้ำหนักของผลึกลูไซต์ (leucite weight fraction) จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเพิ่มเท่ากับ $0.073 \times 10^{-6} / {}^{0}$ซ ซึ่งค่านี้ถ้าเทียบกับค่าปกติของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนซึ่งเท่ากับ $14 - 15 \times 10^{-6} / {}^{0}$ซ พบว่ามีค่าน้อยมากไม่มีผลต่อการกำหนดค่าของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของพอร์ซเลนได้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงให้ผลการทดลองที่แตกต่างกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Mackert และ Evans (1991b) ทำให้เกิดข้อสงสัยว่า วิธีการทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ มีผลต่อการเกิดของปริมาณลูไซต์ แล้วส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน

ผลกระทบจากการทำให้พอร์ซเลนเย็นตัวอย่างช้าๆ ภายหลังการเผาต่อพอร์ซเลนและโครงโลหะยังเป็นข้อมูลที่ไม่ชัดเจน เนื่องจากภายหลังการเผาขึ้นรูปชิ้นงานบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลน พบว่ากรรมวิธีการให้พอร์ซเลนเย็นตัวอย่างช้า หรือ การให้พอร์ซเลนเย็นตัวอย่างรวดเร็วนั้นต่างก็มีการปฏิบัติกันทั้ง 2 วิธี โดยมีการศึกษาของ Fairhurst และคณะ (1989) พบว่า การเผาชิ้นงานบูรณะฟันด้วย

โลหะเคลือบพอร์ซเลน ณ อุณหภูมิสูงเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปล่อยให้เย็นตัวลงผ่านช่วงอุณหภูมิดังกล่าว การขยายตัวเหตุความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนเหนือช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะแก้ว มีความสำคัญต่อค่าการขยายตัวของพอร์ซเลนที่เหมาะสมกับโลหะ นอกจากนี้ช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะมีการเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการให้ความร้อนและอัตราการปล่อยให้เย็นลง

การศึกษาของ Fairhurst และคณะ (1980) และของ Prasad และคณะ (1988) พบแน่ชัดว่าเมื่อทำการเผาหลายๆ ครั้งหรือการให้ความร้อนด้วยวิธีการอื่นๆ ทำให้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเกิดที่ผิวรอยต่อของพอร์ซเลนกับโลหะ เนื่องจากมีความแตกต่างกันของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของพอร์ซเลน โลหะและออกไซด์ของโลหะ ซึ่งพอร์ซเลนมีพฤติกรรมการขยายตัวที่มีลักษณะแตกต่างจากโลหะผสมมาก

การศึกษาของ Mackert และ Evans (1993) พบว่า การเกิดความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ขยายตัวเหตุความร้อนของลูไซต์และแก้วเมทริกซ์ที่อยู่รอบๆ ของพอร์ซเลนจะทำให้เกิดความเค้นขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดเป็นรอยแตกขนาดเล็กรอบๆ ก้อนผลึกลูไซต์ และมีบางส่วนของลูไซต์เกิดการแยกออกจาก (decoupling) แก้วเมทริกซ์ที่อยู่รอบๆ ซึ่งการเพิ่มของความหนาแน่นของรอยแตกขนาดเล็ก (microcrack density) จะเป็นสาเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนลดลง ขณะที่ความหนาแน่นของรอยแตกที่เกิดจากการเข้ารวมกันใหม่ (recoupling) ของลูไซต์ และทำให้การขยายตัวเหตุความร้อนในขบวนการผลิตงานบูรณะฟันเคลือบพอร์ซเลนเพิ่มขึ้น โดยวิธีการเผาใหม่ด้วยอุณหภูมิที่ต่ำลง เพื่อลดความเค้นที่คงอยู่ (isothermal anneal treatments) เช่น การหลอมเชื่อมโลหะใหม่ (post-soldering) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของรอยแตกขนาดเล็ก ลดลงของและเกิดร่วมกับการเพิ่มของการขยายตัวเหตุความร้อน ในการศึกษาดูผลของการเผาพอร์ซเลนหลายๆ ครั้ง ต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของรอยแตกขนาดเล็กโดยทำการเผาพอร์ซเลนหนึ่งครั้งแล้วทำการเผาเพิ่ม 1, 3, 7 และ 5 ครั้ง รวมจำนวนการเผาเป็น 2, 4, 8 และ 16 ครั้ง ตามลำดับ แล้ววัดความหนาแน่นของรอยแตกมาวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ หาค่าเฉลี่ย ความแปรปรวน และวิเคราะห์ความถดถอย พบว่าผลของการเผาหลายครั้งไม่มีผลต่อความหนาแน่นของรอยแตกขนาดเล็กที่ระดับนัยสำคัญ ($p<0.05$) และความหนาแน่นของรอยแตกขนาดเล็กไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน

แต่ Mackert และ Evans (1995) ได้ทำการศึกษาต่อมาที่มีความคล้ายคลึงกันพบว่า เมื่อทำการเผาพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ 6 บริษัท และ "Component No. 1" frit ของ Wenistein และคณะ (1962) แล้วทำการเผาใหม่ที่ 500 องศาเซลเซียส และ 750 องศาเซลเซียส อย่างละ 3 กลุ่มเป็นเวลา 4, 8 และ 16 นาที แล้วทำการวัดด้วยเครื่องวัดการกระเจิงของรังสีเอกซเรย์เชิงประมาณ พบว่าความสัมพันธ์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของลูไซต์และการทำการเผาใหม่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส มีความสัมพันธ์กัน

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.01$) ขณะที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีพอร์ซเลนเพียงชนิดเดียวที่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ ($p < 0.01$) และในการเผาอีกครั้งที่ 750 องศาเซลเซียส จะเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของลูไซต์ระหว่างร้อยละ 6.1 และ 21.3 ซึ่งการเพิ่มของปริมาณลูไซต์นี้สามารถทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน ซึ่งบางครั้งเกิดระหว่างการหลอมเชื่อมโลหะใหม่

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ในการผลิตงานบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลน เมื่อทำการเผาหลายๆ ครั้ง (มากกว่าหรือเท่ากับ 6 ครั้ง) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลูไซต์มากขึ้น แล้วส่งผลกระทบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนกับโลหะ แล้วก่อให้เกิดความเค้นจากการหดตัวขึ้นระหว่างการเย็นตัวลงจากอุณหภูมิการเผาที่สูงเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยแตกแบบทันทีหรือรอยแตกแบบช้าๆ โดยเกิดหลังจากการบูรณะฟันไปแล้วเป็นเวลาหลายเดือน (Mackert, *et al.*, 1986a; 1986b; 1995; Mackert and Evans ,1991a)

มีการศึกษาของ Binns (1983) พบว่า เส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนทางทันตกรรมหลังจากการเผามีหลายรูปแบบ เช่น การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้แก้วไม่มีเวลาพอสำหรับการจัดเรียงตัวของโครงสร้างให้มีความหนาแน่น ทำให้เกิดลักษณะแช่แข็งในภาวะความหนาแน่นต่ำ (frozen-in low-density) ถ้าให้ความร้อนอย่างช้าๆ ใหม่อีกจะมีการเรียงใหม่ ทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น และทำให้มีอัตราการขยายตัวลดลง ส่วนการทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าการขยายตัวเหตุความร้อน เมื่อทำให้พอร์ซเลนเย็นตัวลงจากระยะหลอมเหลว (molten state) ด้วยอัตราการเย็นตัว (cooling rate) อย่างรวดเร็วจะทำให้โครงสร้างของแก้วไม่มีเวลาการจัดเรียงตัวให้เกิดความหนาแน่นมากที่สุด ทำให้โครงสร้างของแก้วมีปริมาตรที่มากเกิน และพบว่าการให้ความร้อนใหม่ด้วยอัตราเร็วที่ต่ำหรือการเผาหลอมใหม่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะแก้วเล็กน้อยจะช่วยลดการเกิดปริมาตรที่มากเกิน และเมื่อพอร์ซเลนถูกทำให้เย็นตัวจากจุดเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะแก้ว ด้วยอัตราการเย็นตัวที่ต่ำ พอร์ซเลนจะสามารถหดตัวให้มีโครงสร้างของแก้วที่หนาแน่นกว่าและมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนมากกว่าการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Mackert, 1988)

การเพิ่มความแข็งแรงของพอร์ซเลนยังสามารถทำได้ โดยทำให้วัสดุเย็นตัวลงอย่างฉับพลันจากอุณหภูมิการเผาที่สูง มีความคล้ายคลึงกับวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระจกและบานประตูแก้ว จะทำให้เกิดความเค้นแบบอัดตกค้างที่ผิว โดยการทำให้ผิวของวัตถุเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (quenching) ขณะที่ผิวของวัตถุยังร้อนและอยู่ในภาวะที่หลอมเหลว (softened state) ซึ่งส่วนของแกนกลางที่หลอมเหลว (molten core) เมื่อเริ่มแข็งตัวจะเกิดการหดตัวขึ้นภายใน ซึ่งผิวชั้นนอกแข็งตัวแล้วทำให้เกิดแรงดึงของแกนกลาง ทำให้เกิดความเค้นแบบดึงตกค้างอยู่ภายในแกนกลาง (residual tensile stresses) และความเค้นแบบอัดตกค้างที่ผิวชั้นนอก (Anusavice, *et al.*, 1989; Anusavice, *et al.*, 1992; Hojjatie and Anusavice, 1993; Anusavice, 1996)

ดังนั้น การเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอร์ซเลน โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิวิกฤต แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันทำให้เกิดความเค้นแบบอัดตกค้างอยู่ภายในผิวพอร์ซเลน จะช่วยส่งเสริมให้เกิดความต้านทานต่อความล้มเหลวที่เกิดจากการดำเนินต่อของรอยแตกบนพื้นผิวที่มีลักษณะรูพรุนที่เป็นตำหนิ (flaw) อยู่ภายในได้ การกระทำของความเค้นแบบอัดซึ่งก่อให้เกิดความเค้นที่ตกค้างในพอร์ซเลนขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน อุณหภูมิการเริ่มต้นกระทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลัน (Dehoff and Anusavice, 1989)

มีการศึกษาของ Coffey และคณะ (1987) เกี่ยวกับอิทธิพลของความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเหตุความร้อนของโลหะกับพอร์ซเลนทึบแสง และอัตราการทำให้เย็นตัวลง โดยทำเป็นแผ่นโลหะนิเกิล-โครเมียม 60 แผ่น ขนาด 30 มิลลิเมตร x 7 มิลลิเมตร x 7 มิลลิเมตร แล้วทาพอร์ซเลนทึบแสงให้มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร บริเวณพื้นที่ตรงกลาง 7 มิลลิเมตร x 7 มิลลิเมตร บนผิวของแผ่นโลหะแล้วทำการเผา ทำให้เย็นตัวลงด้วยอัตราเร็ว 2 แบบ คือ การเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในอากาศ และเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในเตาเผา (furnance chamber) โดยมีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนระหว่างโลหะที่เป็นโครงสร้างภายในและพอร์ซเลน (αm-αp) 3 ค่า คือ A) - 0.49 x 10^{-6}/ ^{0}ซ B) 1.4 x 10^{-6} / ^{0}ซ และ C) 2.30 x 10^{-6} / ^{0}ซ แล้วทำการทดสอบค่าความแข็งแรงกำลังดัดขวางแบบแรงกดสี่ตำแหน่ง (four-point bending) ด้วยความเร็วของหัวกด (cross head speed) 0.2 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งรอยต่อระหว่างผิวเกิดการแยกออกจากกัน พบว่าค่าเฉลี่ยของการแตกต่างของกลุ่ม A ที่ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจะมีค่าต่ำกว่ากลุ่ม B และ C ที่ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และ กลุ่มที่ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วของกลุ่ม A และ C มีค่าความแข็งแรงกำลังดัดขวางมากกว่ากลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในเตาเผา อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากการศึกษาทำให้สรุปผลได้ว่า การทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ในเตาเผาของชิ้นตัวอย่างที่เป็นโลหะเคลือบพอร์ซเลนที่มีค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนที่เป็นลบ (-0.49 x 10^{-6}/ ^{0}ซ) จะทำให้เกิดการลดลงของค่าความแข็งแรงกำลังดัดขวางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งการศึกษานี้ไม่ได้อธิบายถึงเหตุผลว่าทำไมการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ถึงมีผลต่อค่าความแข็งแรงกำลังดัดขวางของชิ้นงานบูรณะแบบนี้

และการศึกษาของ Coffey และคณะ (1988) ในปีต่อมา มีลักษณะทำนองเดียวกันคือ อิทธิพลของอัตราการทำให้เย็นตัวลงและขนาดความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนระหว่างโลหะและพอร์ซเลน (ceramic veneers) ต่อค่าความต้านทานการล้มเหลวจากกำลังดัดขวาง (flexural failure resistance) ของโลหะและพอร์ซเลนทึบแสงโดยทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบสากล โดยวิธีแรงกดสี่ตำแหน่งด้วยความเร็วของหัวกด (cross head speed) 0.2 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งเกิดรอยแตกเริ่มต้นขึ้นที่รอยต่อระหว่างโลหะกับชิ้นพอร์ซเลนโดยใช้ชิ้นโลหะมีขนาด 0.6 มิลลิเมตร x 7 มิลลิเมตร x 30 มิลลิเมตร กลุ่มละ 20 ชิ้น และใช้พอร์ซเลนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว

เหตุความร้อนแตกต่างกับโลหะ 3 ค่า (αm-αp) คือ กลุ่มที่มีการหดตัวน้อย ($1.9 \times 10^{-6}/{}^{0}$ซ) กลุ่มที่มีการหดตัวปานกลาง ($1.4 \times 10^{-6}/{}^{0}$ซ) และกลุ่มที่มีการหดตัวมาก ($-0.2 \times 10^{-6}/{}^{0}$ซ) แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ประมาณ 4 ชั่วโมง 7 นาที และการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในอากาศ จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่ากลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ มีค่าความแข็งแรงกำลังดัดขวางต่ำกว่ากลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และถ้าไม่พิจารณาถึงการทำให้เย็นลง พบว่ากลุ่มที่ความแตกต่างของการหดตัวมากที่มีค่าเป็นลบ ($-0.2 \times 10^{-6}/{}^{0}$ซ) จะมีค่าความล้มเหลวจากกำลังดัดขวางต่ำกว่ากลุ่มที่มีความแตกต่างของการหดตัวที่เป็นบวก และการศึกษานี้ก็ไม่ได้อธิบายเหตุผลของการทดลองเช่นเดียวกัน

มีการศึกษาต่อมาของ Anusavice และคณะ (1989) ยืนยันว่า วิธีการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันส่งเสริมให้เกิดความต้านทานต่อการเกิดรอยแตกเริ่มต้นและการดำเนินต่อของรอยแตกได้ขึ้นอยู่กับอัตราการทำให้เย็นตัวลง ซึ่งในการทดลองมีการศึกษาการทำให้เย็นตัวลง 3 แบบ คือ การปล่อยให้เย็นตัวลงในเตาเผา การปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ และการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันโดยการเป่าด้วยแรงลม (compressed air) เป็นเวลา 90 วินาที นอกจากนี้ ความต้านทานต่อการเกิดรอยแตกยังมีความสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนแต่ละชนิด โดยทำเป็นชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่น ประกอบด้วย ชั้นของพอร์ซเลนทึบแสง กับชั้นพอร์ซเลนเนื้อฟัน ที่มีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน 2 ชนิด ซึ่งมีทั้งค่าความแตกต่างที่เป็นบวกและลบ (α_O-α_B) คือ +3.2 , +0.7 , 0.0 , -0.9 และ $-1.5 \times 10^{-6}/{}^{0}$ซ แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องกดทำให้เกิดรอยแตก (microhardness indenter) ด้วยแรง 4.9 นิวตัน จำนวน 80 จุดตามเส้นผ่าศูนย์กลาง แล้วทำการวัดรอยแตก พบว่าค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยแตกมีความแตกต่างตั้งแต่ 75.9 ไมโครเมตร ($\alpha_O - \alpha_B = -1.5 \times 10^{-6}/{}^{0}$ซ) ถึง 103.3 ไมโครเมตร ($\alpha_O - \alpha_B = +3.2 \times 10^{-6}/{}^{0}$ซ) และผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงผลของรอยแตกที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับ อัตราการเย็นตัวลง ค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนและผลกระทบของทั้งสองปัจจัย ที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.001$) และจากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม โดยใช้วิธีการทดสอบแบบทูกีร์ (Tukey's HSD test) พบว่าขนาดของรอยแตกของกลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันมีขนาดเล็กกว่า กลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในอากาศและกลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงในเตาเผาอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น ($p < 0.05$)

นอกจากนี้ยังมีผลของการศึกษาที่สนับสนุนว่า การเกิดความเค้นจากวิธีการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันสามารถยับยั้งการดำเนินต่อของรอยแตกที่ผิวชั้นในของชิ้นแผ่นตัวอย่างของพอร์ซเลน ที่มีค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การหดตัวที่เป็นบวกและลบหลายๆ ระดับของพอร์ซเลนทึบแสงและชั้นพอร์ซเลนเนื้อฟัน แล้วทำให้เย็นตัวลง 3 วิธี คือ การทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ในเตา การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในอากาศ และการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันโดยการเป่าผิวของของพอร์ซเลนด้วยลม

เป็นเวลา 90 วินาที แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องกดวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker microhardness indenter) ด้วยแรง 4.9 นิวตัน จำนวน 80 จุดตามเส้นผ่าศูนย์กลาง แล้วทำการวัดรอยแตกเป็นฐานอ้างอิง (baseline) และวัดอีกหกเดือนหลังจากนี้และยังทดสอบค่ากำลังดัดขวางสองแนวแกน (biaxial flexure tests) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนชี้ให้เห็นว่า ปัจจัยทั้งอัตราการเย็นตัวลงและค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนมีอิทธิพลต่อรอยแตก ที่ระดับความเชื่อมั่น ($p < 0.001$) และจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้วิธีการทดสอบแบบที (T-test) พบว่า ความยาวของรอยแตกของกลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันที่ฐานอ้างอิงและที่หกเดือนมีขนาดเล็กกว่า กลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในอากาศและกลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงในเตาเผาอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันจะลดขนาดเริ่มแรกของรอยแตกที่ผิว แต่ไม่ค่อยมีผลต่ออัตราการดำเนินต่อของรอยแตก แต่การศึกษาทั้งสองนี้เป็นการศึกษาผลของการเย็นตัวที่มีผลต่อความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนสองชนิดคือ พอร์ซเลนทึบแสง กับชั้นพอร์ซเลนเนื้อฟัน โดยไม่มีโลหะเข้ามาเกี่ยวข้อง และเป็นการศึกษาถึงความแข็งแรงของพื้นผิว ไม่ใช่ความแข็งแรงกำลังดัดขวาง (Anusavice and Hojjatie,1991)

และมีการศึกษาของ Anusavice และคณะ (1991) ที่คล้ายคลึงกันคือ ใช้ชิ้นตัวอย่างพอร์ซเลนเนื้อฟันมีลักษณะเป็นแผ่นกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่เย็นตัวลงอย่างฉับพลันโดยใช้แรงลมเป่า จากอุณหภูมิเริ่มต้น 982 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.34 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 90 วินาที เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ในเตาเผา จากนั้นทดสอบด้วยเครื่องกดวัดความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ พบว่ากลุ่มที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันมีขนาดของรอยต่อเริ่มต้นที่เล็กกว่ากลุ่มที่ปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ในเตาและยังพบอีกว่าการทำให้เกิดความเค้นจากวิธีการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลัน มีอิทธิพลยับยั้งการเกิดของรอยแตกเริ่มต้นขนาดเล็ก (half-penny cracks) ด้วยความลึกเริ่มต้นอย่างน้อย 100 ไมโครเมตร

และมีการศึกษาต่อมาของ Hojjatie และ Anusavice (1993) ทำการทดสอบการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันในน้ำมันซิลิโคน (silicone oil) เปรียบเทียบกับการใช้แรงดันลมในการเป่าให้เย็นตัวลงโดยใช้ชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีทั้งชั้นของพอร์ซเลนทึบแสงและชั้นของพอร์ซเลนเนื้อฟันที่มีค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนทั้งสองชนิด ($\alpha_o - \alpha_B$) เท่ากับ –1.5 , 0.0 และ +3.2 X 10^{-6}/ ^{0}ซ แล้วแบ่งออกเป็นกลุ่มทำให้เย็นตัวลงในเตาเผา กลุ่มทำให้เย็นตัวลงโดยนำออกจากเตาเผาทันที กลุ่มที่ใช้แรงดันลมในการเป่าให้เย็นตัวลง พบว่าค่าความยาวโดยเฉลี่ยของรอยแตกที่เกิดโดยเครื่องทดสอบความแข็งแรงที่ผิวของพอร์ซเลนในน้ำมันซิลิโคนมีขนาดเล็กกว่าการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันโดยการเป่าผิวด้วยแรงลม อย่างไรก็ตามวิธีการทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วในน้ำมันซิลิโคน มีอัตราเสี่ยงต่อการเกิดความล้มเหลวได้ง่ายกว่าการทำให้เย็นตัวลงอย่างฉับพลันโดยการเป่าผิวด้วยแรงลม เนื่องจากผลกระทบของ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ถ้าการทำให้เย็นตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส และการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดผลดี ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นควรอยู่ในช่วงระหว่างอุณหภูมิ 650 ถึง 850 องศาเซลเซียส แต่การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของการเย็นตัวที่มีผลต่อความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนสองชนิดคือ พอร์ซเลนทึบแสงกับชั้นพอร์ซเลนเนื้อฟัน โดยไม่มีโลหะเข้ามาเกี่ยวข้องและ เป็นการศึกษาถึงความแข็งแรงของพื้นผิว ไม่ใช่ค่ากำลังดัดขวาง

จากการรวบรวมปริทัศน์วรรณกรรมที่กล่าวมาทั้งหมดนี้พอสรุปได้ว่า คุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องการของพอร์ซเลนเฟลด์สปาร์ เช่น ทางเชิงกล กายภาพ เคมี ความคงทน ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบพอร์ซเลนนั้น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการเกิดของผลึกลูไซต์ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับภาวะการเย็นตัวลงของพอร์ซเลนภายหลังการเผาขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงทั้งลักษณะ รูปร่าง จำนวนและปริมาตรของผลึกลูไซต์ มีผลกระทบต่อความเหมาะสมของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนกับโลหะที่เป็นโครงสร้างภายใน แล้วส่งผลต่อค่าความกำลังดัดขวาง และความโปร่งแสง ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษามาแล้วมากมาย แต่เป็นการศึกษาความสัมพันธ์อย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น ภาวะการเย็นตัวลงกับปริมาณการเกิดของผลึกลูไซต์ ภาวะการเย็นตัวลงกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลน ผลกระทบต่อความเหมาะสมของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของพอร์ซเลนกับโลหะที่เป็นโครงสร้างภายใน กับค่าความกำลังดัดขวาง เป็นต้น ยังขาดการศึกษาที่แสดงให้เห็นชัดเจนถึงอิทธิพลของภาวะการเย็นตัวลงที่ต่างกัน ต่อการเกิดปริมาณของผลึกลูไซต์ แล้วกระทบต่อคุณสมบัติหลายๆ อย่างของพอร์ซเลนมารวมกัน นอกจากนี้พอร์ซเลนเฟลด์สปาร์และโลหะได้มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงไปจากสูตรดั้งเดิมอย่างมาก จึงทำให้ยังขาดคำอธิบายที่ชัดเจนถึงความเกี่ยวเนื่องของผลจากภาวะการเย็นตัวลงที่ต่างกันต่อผลึกลูไซต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย