

## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### พอร์ซเลนทางทันตกรรม (Dental porcelain)

พอร์ซเลนโดยทั่วไปเป็นวัสดุแข็ง สีขาว สามารถผสมเป็นสีอื่นได้ พอร์ซเลนได้จากการเผาส่วนผสมของดินขาว (kaolin) เฟลด์สปาร์ (feldspar) และควอตซ์ (quartz) หรือวัสดุอื่นที่มีซิลิกา ตัวอย่างเช่น เครื่องถ้วยชาม เครื่องสุขภัณฑ์ และเครื่องตกแต่ง คุณสมบัติของพอร์ซเลนโปร่งใส รูพรุนน้อยมาก แต่เปราะและแตกง่าย

องค์ประกอบที่สำคัญของผงฟันพอร์ซเลนคงเหมือนกับของพอร์ซเลนทั่ว ๆ ไป เว้นแต่อัตราส่วนแตกต่างกันออกไป และมีเนื้อละเอียดกว่าเพื่อจะได้ค่าของกลสมบัติบางอย่างสูงขึ้น

พอร์ซเลนที่ใช้ประดิษฐ์ฟันประดิษฐ์มี 3 ประเภทคือ (เจน รัตนไพศาล, 2533)

ก. ฟันพอร์ซเลนสำเร็จรูป (porcelain artificial teeth) ผลิตสำเร็จรูปเป็นชุด ๆ ของฟันบนและล่างทั้งปาก และชนิดเป็นซี่เดี่ยว ๆ สำหรับเป็นฟันแขวน (pontic) ในสะพานฟัน มีสี ขนาดและรูปร่างต่าง ๆ ไว้สำหรับเลือก

ข. ผงฟันพอร์ซเลน (fused porcelain) ผลิตเป็นผง สำหรับปั้นครอบฟันหน้า (jacket crown) ซึ่งมีทั้งชนิดที่ประดิษฐ์ด้วยพอร์ซเลนล้วน (all porcelain) และครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (porcelain fused to metal) และอุดฝัง (inlay) ทันตแพทย์ที่สนใจหรือผู้ชำนาญงาน (technician) เป็นผู้ประดิษฐ์โดยนำผงฟันพอร์ซเลนปั้นเป็นรูปฟันตามต้องการ แล้วนำไปเผา

ค. ผงเคลือบโลหะ (ceramic enamel) ทำหน้าที่คล้ายเคลือบฟัน (enamel) ประกอบด้วยน้ำยาเคลือบกับผงเคลือบ ใช้เคลือบบนปลอกโลหะหรือฟันแขวน

พอร์ซเลนทางทันตกรรมได้รับความนิยม เพราะสีใกล้เคียงฟันธรรมชาติ สึกหรอน้อยมากและอายุคงทน ไม่เกิดปฏิกิริยาใด ๆ ปัจจุบันจึงมีการนำพอร์ซเลนมาใช้กันอย่างแพร่หลาย

## ส่วนประกอบ (composition) (Muia,1982 ; Craig,1993)

คุณสมบัติของพอร์ซเลนขึ้นอยู่กับ การเลือกส่วนประกอบ คือมีอัตราส่วนที่ถูกต้องและ ความคุมขั้นตอนการเผาได้ดี ส่วนประกอบที่บริสุทธิ์ที่สุดจะถูกเลือกใช้ในฟันพอร์ซเลน เนื่องจาก ต้องการสีที่เที่ยงตรง มีความเหนียว (toughness) โดยไม่มีความเปราะ (brittleness) ไม่ละลายและ มีความโปร่งแสงรวมถึงความแข็งแรงและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ (coefficient of thermal expansion) หลายครั้งที่ผลออกมาวัสดุจะมีคุณสมบัติครึ่ง ๆ กลาง ๆ

### 1. ดินขาว หรือ คาโอลิน (kaolin)

เป็นส่วนที่ได้จากเฟลด์สปาร์ระหว่างขั้นตอนการเวทเทอริง (weathering) ไปแคลเซียม ซิลิเกตจะถูกล้างละลายออกมาโดยน้ำกรด ส่วนที่เหลืออยู่จะสะสมอยู่เป็นกองในรูปของดินเหนียว มีหลายรูปแบบเช่น ไพป์เคลย์ (pipe clay) พอตเตอร์เคลย์ (potter's clay) และไฟรด์เคลย์ (fire clay) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับเคลย์ที่ใช้ทำฟัน แต่ใช้เฉพาะเคลย์บริสุทธิ์หรือคาโอลินเท่านั้นใน พอร์ซเลน

คาโอลินตามสูตร  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  เตรียมจากการล้างด้วยน้ำจืด ๆ กันจนวัสดุที่ แปรกลบอมอื่นหลุดแยกออกไป ทิ้งให้ตกตะกอนแล้วนำไปทำให้แห้งและคัดเลือก ผงที่มีสีขาว จะถูกนำมาใช้ คาโอลินจะให้คุณสมบัติที่เป็นความทึบแสง (opaqueness) เมื่อผสมกับน้ำจะมี ลักษณะเหนียวและใช้เป็นตัวก่อรูปของพอร์ซเลนให้ได้รูปร่าง มีข้อดีระหว่างการทำพอร์ซเลน ง่ายและแต่งได้ง่าย แต่ไม่พบในพอร์ซเลนที่ใช้ทำเคลือบฟันเนื่องจากทึบแสงมากเกินไป เมื่อได้ รับความร้อนจะยึดเข้ากับโครงร่าง (framework) ของผงควอตซ์และมีการหดตัว

### 2. เฟลด์สปาร์ (felspar)

เป็นผลึก (crystalline) และทึบแสง มีสีไม่แน่นอนระหว่างสีเทาและชมพู ทางเคมี เรียก โพตัสเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต (potassium aluminium silicate) ประกอบด้วย  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$  เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิ 1,290 องศาเซลเซียส กลายเป็นวัตถุเหมือนกระจก และถ้าไม่ได้รับความร้อนมากเกินไปก็จะคงรูปร่างอยู่ได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เราต้องการเมื่อต้องการคงรูปร่างของชิ้นงานขณะเผา

เหล็กและไมกาจะพบได้บ่อยในส่วนประกอบของเฟลด์สปาร์ บางครั้งอาจจะต้องเอา เหล็กออกไปเพราะออกไซด์ของโลหะจะทำให้เกิดสีเข้มมากในพอร์ซเลน การเอาเหล็กออกทำ โดยเอาเฟลด์สปาร์แต่ละชิ้นมาทุบด้วยก้อนเหล็ก แล้วเลือกเฉพาะชิ้นที่มีสีอ่อนมาใช้ในพอร์ซเลน

แล้วนำมาบดด้วยลูกกลิ้งจนได้ผงที่ละเอียด ขนาดของผงชั้นสุดท้ายต้องควบคุมโดยการคัดเอาขนาดผงที่หยาบออกไปโดยใช้วิธีลอยน้ำแยกเอาผงละเอียดออก ผงที่แห้งแล้วจะนำมาสันซ้ำ ๆ ให้ไหลลงตามพื้นเอียงของเครื่องมือซึ่งเป็นชั้นแคบ ๆ โดยการเหวี่ยงน้ำหนักแม่เหล็ก ส่วนของเหล็กที่ปะปนอยู่จะถูกแยกออกและนำเฟลด์สปาร์ไปใช้

เฟลด์สปาร์จะเป็นก้อน (bulk) ของหินพอร์ซเลนซึ่งอัตราส่วนผสมแตกต่างจากพอร์ซเลนที่ใช้ในอุตสาหกรรม โปแตสเฟลด์สปาร์ (potash felspar) จะเป็นชนิดที่ใช้มากในหินพอร์ซเลนซึ่งจะช่วยให้มีคุณสมบัติความโปร่งแสงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีความมันเงาเมื่อรวมกับคาโอลินและควอตซ์ แม้ว่าเฟลด์สปาร์จะมีมากแต่ชนิดที่ใช้ในหินพอร์ซเลนจะหายาก โดยเฟลด์สปาร์จะเป็นตัวบอกระดับคุณภาพที่บริษัทพยายามให้ได้ดีที่สุด . ถ้าไม่มีโปแตสเฟลด์สปาร์อาจใช้โซเดียมเฟลด์สปาร์แทนได้ แต่ความโปร่งแสงน้อยกว่า ระหว่างเฟลด์สปาร์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกลายเป็นก้อนผลึกคล้ายแก้ว (glassy crystalline mass) บางบริษัทใช้เนฟีไลน์ ไชนไนท์ (nepheline syenite) แทน ซึ่งประกอบด้วยอะไบต์ (abite) 50 % ไมโครไลน์ (microlite) 25% และเนฟีไลต์ (nephelite) 25% ซึ่งจะขยายช่วงเวลาก่อตัว (maturing range) ทำให้เป็นพอร์ซเลนที่เผาโดยอุณหภูมิสูงและแข็งแรง

พอร์ซเลนแต่ละชนิดจะต้องบอกอุณหภูมิการเผาเฉพาะของคนเกี่ยวกับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิซึ่งควรทำตาม ระหว่างเผาเมื่อเฟลด์สปาร์เชื่อมและแยกออกเป็นส่วน ๆ จะเกิดวัสดุใหม่ขึ้นเรียกลิวไซด์ (leucite) ตามตารางการเผา ลิวไซด์จะถูกละลาย ควรกำหนดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิด้วย ลิวไซด์บางส่วนจะไม่ถูกละลายมีผลให้ชิ้นงานมีความโปร่งแสงน้อย ซึ่งมีโอกาสหักได้ด้วย ด้วยเหตุผลนี้เตาเผารุ่นใหม่จึงมีที่กำหนดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเฉพาะกับพอร์ซเลนด้วย ความล้มเหลวหรือความเสียหายต่าง ๆ อาจเกิดได้จากการเผาไม่ดี

### 3. ซิลิกา (silica)

ใช้ในรูปผลึกของควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) อาจมีเหล็กผสมอยู่บ้างเหมือนในเฟลด์สปาร์จึงควรกำจัดออกเพื่อป้องกันการเปลี่ยนสี การเตรียมซิลิกาเหมือนกับในเฟลด์สปาร์ ยกเว้นซิลิกาควรทำให้ขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซิลิกาจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิเผาพอร์ซเลนปกติ (high fusing temperature) จึงทำให้ซิลิกาเป็นส่วนที่มีความเสถียรภาพของก้อนวัสดุ จึงทำหน้าที่คล้ายเป็นโครงร่างสำหรับส่วนประกอบอื่นระหว่างเป็นเฟสของเหลว ส่วนของควอตซ์จะเป็นน้ำและไม่ละลายจะทำให้เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิโดยรวมของพอร์ซเลน การ

เผามากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกหักได้เนื่องจากไม่สมดุลย์ในบริเวณนี้ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิจะเป็นคุณสมบัติสำคัญและจะต้องใกล้เคียงกันระหว่างโลหะและพอร์ซเลน

#### 4. คริสโตบาลไลท์ (crystalite)

เป็นอีกประเภทหนึ่งของซิลิกา ใช้ในการควบคุมสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิถ้าเพิ่มเข้าไปจะทำให้ค่าลดลงจากจุดที่ร้อนจากการกรอบเพื่อไม่ให้แตก ถ้าไม่ระวังในการเลือกควอตซ์และไม่อยู่ในรูปที่บริสุทธิ์แล้ว การปนเปื้อนจะทำให้พอร์ซเลนเปลี่ยนได้

การเผาอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เปลี่ยนคุณสมบัติและอาจทำให้พอร์ซเลนแตกได้ตั้งแต่มื่อเอาออกจากเตาหรือเมื่อผู้ป่วนนำไปใช้งาน มักพบบ่อยเมื่อเผาพอร์ซเลนอุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนด มากกว่าการเผาเคลือบผิวปกติ แม้ว่าการเผาใหม่จะทำให้พอร์ซเลนหลอมแต่ก็ได้ชั่วคราวและเปลี่ยนอายุการใช้งาน ควรกระเทาะออกแล้วทำใหม่จะดีกว่า

#### 5. อลูมินา (alumina)

ในยุโรปมักใช้อลูมินาแทนซิลิกา เพื่อให้ฟันแข็งแรงโดยเฉพาะรอบ ๆ เดือย ฟันสามารถมีอลูมินาได้ 60-70% และมีการเกิดผลึกมากกว่าจึงลดการหักได้ Mclean (1980) ได้ใช้อลูมินาทำเป็นส่วนแกนภายใน (inner core) ความแข็งแรงของฟันพอร์ซเลนแฉีกแตกจะเทียบได้กับพอร์ซเลนเคลือบบนผิวของกรอบโลหะ และไม่ต้องใช้โลหะเป็นส่วนรองรับ

#### 6. สารที่ให้สี (coloring agents)

ส่วนประกอบหลักของฟันพอร์ซเลนจะไม่มีสี สารที่แต่งสีจะใส่เพิ่มเพื่อช่วยให้ชิ้นงานสีเหมือนฟันธรรมชาติมากที่สุด เม็ดสีที่ใส่ในพอร์ซเลนเรียก ผงสี (color frits) โดยใส่เพียงจำนวนน้อย ๆ เพื่อให้มีสีเหมือนฟันธรรมชาติตามที่ต้องการ เตรียมได้จากการบดออกไซด์ของโลหะเข้ากับแก้วที่ละเอียดและเฟลด์สปาร์ นำส่วนผสมไปเผาในเตาและบดให้เป็นผงอีกครั้ง ปัจจุบันปัญหาคือการเลือกวัสดุที่ใช้ที่จะต้องอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงได้ สีที่ใช้มากที่สุดคือสีเหลืองซึ่งได้จากวานาเดียม (vanadium) โครเมียม (chromium) ก็ให้สีเหลืองเมื่อละลายด้วยไททาเนียมออกไซด์ (titanium oxide) เซอโคเนียม (zirconium) จะมีสีขาว สีดำจะได้จากเหล็กออกไซด์ (iron oxide) สีน้ำเงินจะได้จากเกลือของโคบอลต์ (cobalt salts) แมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide) ให้สีม่วง ทองแดง (copper) ให้สีเขียว นิกเกิลออกไซด์ (nikel oxide) ให้สีน้ำตาล ในทุกสีที่มี สีชมพูจะคงอยู่ในพอร์ซเลนได้ยากที่สุดเนื่องจากไม่สามารถคงอยู่ในอุณหภูมิสูงขณะเตรียมได้

เมื่อทำอย่างเหมาะสมแล้วสีของพอร์ซเลนส่วนใหญ่จะยังคงอยู่ระหว่างชั้นตอนทำ แต่การเผาอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เผาสีและเกิดสีหายไปหรือเปลี่ยนสีไปถ้าสียังคงอยู่ในอุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นจึงควรระวังและควรสังเกตสีบ่อย ๆ เพื่อให้เป็นมาตรฐาน ปัญหาเรื่องสีส่วนใหญ่จะเกิดจากการเผาอุณหภูมิสูงเกินไปหรือการปรับมาตรฐานผิด

### 7. ฟลูออเรสเซน (fluorescence)

ฟันธรรมชาติจะมีแสงฟลูออเรสเซนสีขาวเหลืองซึ่งเป็นสิ่งที่ทำลายสำหรับพอร์ซเลนเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้ตรวจภายใต้แสงอุตราไวโอเลตพบว่าไม่มีคุณสมบัตินี้อยู่ เมื่อเข้าสถานที่ที่มีแสงสีน้ำเงิน (end of spectrum) เหมือนแสงอุตราไวโอเลตจะทำให้ชิ้นงานดูดำและไม่เหมือนธรรมชาติ ฟันธรรมชาติจะมีลักษณะฟลูออเรสเซนด้วยเมื่อโดนแสงแดด ดังนั้นชิ้นงานควรจะมีด้วยจึงจำเป็นที่จะต้องเติมสีเพิ่ม เม็ดสีที่ใช้คือยูเรเนียม (uranium) ซึ่งจะทำให้สีเหลืองสว่างขึ้นเนื่องจากมีคุณสมบัติการแผ่รังสี (radioactivity) อยู่จำนวนเล็กน้อย อาจใช้แลนทาไนด์เอิร์ธ (lanthanide earth) แทนได้ แต่ถ้ามากเกินไปอาจใช้เกลือเซเรียม (cerium salts) ซึ่งให้ฟลูออเรสเซนสีน้ำเงินขาวแทนพอร์ซเลน ส่วนใหญ่จะทำให้มีฟลูออเรสเซนทั้งที่จริงแล้วไม่สามารถลอกเลียนฟลูออเรสเซนสีเหลืองขาวของ ฟันธรรมชาติได้

ควรระวังอันตรายจากรังสีรอบ ๆ ในฟันปลอมจะแผ่รังสี 1.5 เท่าของรังสีปกติซึ่งอาจเป็นอันตรายกับผู้ใส่ได้ และเมื่อใช้ผงเซรามิกจะมีรังสีแผ่ออกนามากกว่าปกติ 3 เท่า Moore และ MacCulloch (คัดลอกจาก Muia, 1987) แนะนำไม่ให้ใช้ปากดูดแปรงหรือเครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้กับพอร์ซเลนเพราะจะทำให้กลืนลงไปได้ ถ้าได้รับยูเรเนียมเข้าไปมากอาจทำให้เกิดมะเร็งของกระเพาะปัสสาวะได้ ควรระวังระบบอากาศเพราะจะทำให้ชุดพอร์ซเลนเข้าไปได้ ไม่ควรทำต่อเนื่องจึงจะไม่มีผลจากรังสี บริษัทควรมีคำแนะนำและวิธีใช้ให้ผู้ใช้ด้วยเพื่อจะได้ระมัดระวังในการใช้

แต่ละบริษัทจะไม่บอกสูตรของพอร์ซเลนโดยจะบอกเพียงคร่าวๆ แต่ไม่บอกวิธีการเตรียมและเทคนิคการเผา สูตรที่บอกประกอบด้วยเฟลด์สปาร์ 75-85% ของทั้งหมด ควอตซ์ 12-22% และคาโอลิน 3-5% ส่วนเม็ดสีจะมีน้อยมาก สูตรทั่วไปสำหรับพอร์ซเลนส่วนเนื้อฟัน (body porcelain) อยู่ในตารางที่ 2-1 ส่วนสูตรของพอร์ซเลนละเอียดที่ใช้ในการแต่งสีเพิ่มจะมีส่วนประกอบแตกต่างกันไปดังตารางที่ 2-1 แต่จะมีส่วนประกอบหลัก 3 อย่างเหมือนกันคือเฟลด์สปาร์ ควอตซ์และดินขาว

ตารางที่ 2-1 แสดงส่วนประกอบของพอร์ซเลน

ส่วนประกอบ	พื้นพอร์ซเลน (น.น.%)	พอร์ซเลนที่ใช้แต่งสี (น.น.%)
เฟลด์สปาร์	81	15
ควอตซ์	15	14
คาโอลิน	4	70
เม็คลี	น้อยกว่า 1	1

พอร์ซเลนที่ใช้ในพอร์ซเลนที่ใช้โลหะเป็นฐานและสะพานฟันจะเป็นพอร์ซเลนที่เผาในอุณหภูมิต่ำ (low fusing porcelain) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังตารางที่ 2-2 ซึ่งจะมีโปแตสเซียมอะลูมิโนซิลิเกต และ ไททานเนียมออกไซด์ ดีบุกออกไซด์และเซอร์โคเนียมออกไซด์ เป็นสารทึบแสง (opacifiers)

ตารางที่ 2-2 แสดงส่วนประกอบของพอร์ซเลนสำหรับหลอมเชื่อมกับโลหะผสมที่ทนอุณหภูมิสูง

Compound	Biodent opaque BG 2 (%)	Ceramco opaque 60 (%)	V.M.K. opaque 131 (%)	Biodent dentin BD 27 (%)	Ceramco dentin T 69 (%)
SiO <sub>2</sub>	52.0	55.0	52.4	56.9	62.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.55	11.65	15.15	11.80	13.40
CaO	—	—	—	0.61	0.98
K <sub>2</sub> O	11.05	9.6	9.9	10.0	11.3
Na <sub>2</sub> O	5.28	4.75	6.58	5.42	5.37
TiO <sub>2</sub>	3.01	—	2.59	0.61	—
ZrO <sub>2</sub>	3.22	0.16	5.16	1.46	0.34
SnO <sub>2</sub>	6.4	15.0	4.9	—	0.5
Rb <sub>2</sub> O	0.09	0.04	0.08	0.10	0.06
BaO	1.09	—	—	3.52	—
ZnO	—	0.26	—	—	—
UO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , and H <sub>2</sub> O	4.31	3.54	3.24	9.58	5.85

#### กลาตมอดิฟายเออร์ (glass modifiers) (Phillips,1991)

แรงยึดระหว่างผลึกซิลิกาถูกสลายด้วยการเติมไอออนของโลหะเข้าไปได้แก่โซเดียมโปแตสเซียม หรือแคลเซียมในลักษณะที่เป็นคาร์บอเนต ไอออนเหล่านี้จะเชื่อมกันด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมของเตตระฮีดรัล (tetrahedral) และขัดขวางการเชื่อมกันของออกซิเจนกับซิลิกา

(oxygen-silica bond) ได้เป็นโครงตาข่ายซิลิกา 3 มิติที่ประกอบด้วย ซิลิกาเตตระฮีดรา (silica tetrahedra) เชื่อมกันเป็นเส้นตรงที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอะตอมที่ติดอยู่ในโครงสร้างซิลิกาเตตระฮีดรา 3 มิติ การเคลื่อนที่ที่ง่ายนี้ทำให้เกิดมีคุณสมบัติความเหลว (fluidity) เพิ่มขึ้น (ลดความหนืดลง) และอุณหภูมิที่ทำให้อ่อนตัวต่ำลงกลายเป็น กลาสมอดิฟายเออร์ ความเข้มข้นของกลาสมอดิฟายเออร์ ถ้าสูงเกินไปจะทำให้ลดความทนทานต่อสารเคมี (น้ำ กรดและอัลคาไลน์) ของแก้ว ในทางเดียวกันถ้ามีเตตระฮีดรัลจำนวนมากที่ถูกขัดขวาง แก้วจะเกิดการตกผลึก (crystallize, devitrify) ดังนั้นความสมดุลระหว่างช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสมและความทนทานต่อสารเคมีที่ดีควรจะคงเอาไว้

บริษัทผู้ผลิตได้ทำกลาสมอดิฟายเออร์ เพื่อทำพื้นพอร์ซเลนด้วยอุณหภูมิเผาที่แตกต่างกัน ความมุ่งหมายของการเผา เพื่อให้ผงของส่วนประกอบของดินขาว ควอตซ์ เฟลด์สปาร์หลอมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ความร้อนช่วย (pyrochemical reaction) สามารถแบ่งพอร์ซเลนออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ (เจน รัตนไพศาล, 2533 ; Phillips, 1991)

1. ผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสูง (high temperature maturing porcelain) อุณหภูมิระหว่าง 1,290-1,370 องศาเซลเซียส (2,350-2,500 องศาฟาเรนไฮต์) มีส่วนประกอบคล้ายกับส่วนประกอบของพื้นพอร์ซเลนชุด คือ ประกอบด้วยเฟลด์สปาร์ 80% ควอตซ์ 15% และดินขาว 5% ทำเป็นผงขนาด 7-10 ไมครอน ระดับนี้ส่วนเนื้อ (matrix) ประกอบด้วยเฟลด์สปาร์ร่วมกับดินขาวเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนควอตซ์ซึ่งไม่หลอมปะปนอยู่ในเนื้อเป็นแกน (coring agent) หรือวัสดุอุดแทรก (filler) เนื้อที่ถูกเผาในอุณหภูมิสูงหนืดมาก ถ้ามีฟองอากาศตกค้างจะไม่สามารถไล่ออกได้ ระยะนี้ไม่มีการหดตัว แต่ไม่เป็นเงามัน

2. ผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาปานกลาง (medium temperature maturing porcelain) อุณหภูมิระหว่าง 1,095-1,260 องศาเซลเซียส (2,000-2,300 องศาฟาเรนไฮต์) ประกอบด้วยเฟลด์สปาร์ 60% ควอตซ์ 25% และสารช่วยหลอมละลาย (fluxing agent) ซึ่งทำให้ช่วงหลอมเหลวแคบลง เช่น โพแทส ( $K_2O$ ) โซดา ( $Na_2O$ ) โคลิม ( $CaO$ ) และกรดบอริก เฟลด์สปาร์และดินขาวรวมตัวเป็นหย่อม ๆ เกิดช่องว่าง เกิดการหดตัว ผิวเป็นเงา (glossy)

3. ผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาต่ำ (low temperature maturing porcelain) อุณหภูมิระหว่าง 870-1,065 องศาเซลเซียส (1,600-1,950 องศาฟาเรนไฮต์) ใช้หลอมติดกับโลหะ (porcelain to metal) เป็นเคลือบโลหะ เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวน้อยกว่าชนิดที่จุดหลอมเหลวสูง เป็นระยะเฟลด์สปาร์เริ่มแข็ง และดินขาวเริ่มอ่อนตัว อนุภาคต่าง ๆ ยังไม่จับ การหดตัวยังไม่ปรากฏ

พอร์ซเลนที่เผาอุณหภูมิต่ำกว่านี้สามารถทำได้ แต่ความทนทานต่อสารเคมีไม่ดี การทำการเคลือบผิวควรทำแบบไม่ใช้น้ำยาเคลือบผิวจะดีกว่า เพราะน้ำยาเคลือบผิวจะมีกลาสมอดิฟายเออร์มากกว่าและมีอุณหภูมิเผาต่ำกว่า สัดส่วนของกลาสมอดิฟายเออร์ที่สูงจะลดความต้านทานของพอร์ซเลนที่ละลายโดยของเหลวในช่องปาก

สิ่งที่สำคัญสำหรับกลาสมอดิฟายเออร์ คือ น้ำ ไฮโดรเจนไอออน (ไฮโดรเนียม,  $H_3O^+$ ) สามารถแทนที่โซเดียมหรือไอออนของโลหะอื่นในแก้วที่มีกลาสมอดิฟายเออร์ได้ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเกิดรอยแตกเล็ก ๆ อย่างช้า ๆ (slow crack growth) ของชิ้นงานพอร์ซเลนได้หลัง 6-7 ปี

#### การหลอมเข้าด้วยกันของพอร์ซเลน (fusion of porcelain) (Craig,1993)

พอร์ซเลนมีการเผา 2 แบบ คือ ควบคุมอุณหภูมิอย่างเดียวหรือควบคุมอุณหภูมิร่วมกับระยะเวลาเผาด้วย วิธีแรกอุณหภูมิในเตาจะเพิ่มเป็นอัตราคงที่จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนด วิธีที่ 2 อุณหภูมิจะเพิ่มเป็นอัตราที่กำหนดจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วคงอยู่ในอุณหภูมินี้อีกช่วงหนึ่งจนกระทั่งปฏิกิริยาสมบูรณ์ ทั้ง 2 วิธีนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่วิธีที่คุมเวลาและอุณหภูมิควรทำมากกว่าเพราะผลเสียน้อยกว่าและได้ผลผลิตที่เป็นรูปแบบมากกว่า พอร์ซเลนเป็นวัสดุที่นำความร้อนไม่ดี ดังนั้นถ้าให้ความร้อนเร็วมากจะทำให้เกิดการหลอมมากเกินไปในชั้นนอกก่อนที่ชั้นในจะหลอมเข้าด้วยกันเรียบร้อย

เทคนิคในการเผามีการเผาในเตาที่มีอากาศและสูญญากาศ ถ้าเลือกเผาในเตาสูญญากาศ จะมีฟองอากาศน้อยกว่าและผิวจะเรียบกว่าเผาในเตาที่มีอากาศ ขณะเผาพอร์ซเลนจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่าง การเปลี่ยนแปลงอันดับแรกคือสูญเสียน้ำที่ทำให้ผงขึ้นรูปได้ น้ำที่มีมากเกินไปจะถูกกำจัดออกโดยอุณหภูมิก่อนที่จะวางลงบนเตาที่มีความร้อนแล้ว หรือวางหน้าเตาเผาเพื่อให้ได้รับความร้อนก่อน (preheated furnace) ประมาณ 5 นาที (Philips,1991) จะทำให้ส่วนของน้ำระเหยไป ซึ่งป้องกันการเกิดไอน้ำขึ้นทันทีและป้องกันการทำลายทางกายภาพของก้อนพอร์ซเลน ทำให้เกิดรูพรุนหรือแตกเป็นชิ้นได้ จึงค่อนำเข้าเตา ภายหลังใส่ชิ้นงานเข้าเตา น้ำที่เป็นหน่วยอิสระและรวมกับตัวอื่น (free and combined water) จะถูกกำจัดออกในขั้นต่าง ๆ ของการให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิขึ้นถึง 480 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงอันดับที่ 2 คือ เมื่ออุณหภูมิเริ่มเพิ่มสูง ผงของพอร์ซเลนหลอมเข้าด้วยกันโดยการซินเทอริง (sintering) ซึ่งเป็นขบวนการที่เกิดสำหรับการหลอมรวมกันของผงขึ้นเคลือบพื้นให้เกิดเป็นก้อนเดียวกัน ระหว่างการเดนซิฟิเคชัน (densification) ปริมาตรจะเปลี่ยน



( $\Delta V$ ) ในขั้นตอนแรกจะสัมพันธ์กับความตึงผิวของผิวเคลือบฟัน คือ  $\gamma$  ความหนืด คือ  $\eta$  ขนาดรัศมีของผง คือ  $r$  และเวลาที่ใช้ซินเทอร์ริง คือ  $t$  ตามความสัมพันธ์

$$\Delta V = 2\gamma t$$

$$V_0 \ 4\eta r$$

จากสมการแสดงว่า ถ้ามีความหนืดต่ำและขนาดผงละเอียด จะมีอัตราของเดนซิฟิเคชันสูง พอร์ซเลนแห้งสามารถวางโดยตรงในเตาที่ร้อนปานกลางได้ถ้ามีการทำให้ร้อนก่อนเล็กน้อย โดยการเปิดประตูเตา หลังขั้นทำให้แห้งอุณหภูมิและเวลาควรควบคุมอย่างระมัดระวังระหว่างการหลอมครั้งสุดท้ายและขั้นตอนการเผาเพื่อเคลือบผิว

#### การเย็นตัวของพอร์ซเลน (cooling) (Phillips,1991)

การเย็นตัวลงที่เหมาะสมจากอุณหภูมิเผาถึงอุณหภูมิห้องเป็นสิ่งที่ยังไม่สรุป การแตกอย่างมากโดยทั่วทั้งก้อน (catastrophic) เป็นการแตกที่อุณหภูมิเปลี่ยนเฉียบพลัน ได้แก่การถูกความเย็นอย่างรวดเร็วภายหลังเผา การเย็นตัวของพอร์ซเลนมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับโลหะที่ใช้ด้วยการทำชิ้นงานพอร์ซเลนเชื่อมกับโลหะให้เย็นลงอย่างช้า ๆ อาจทำให้เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นผลให้เกิดความแตกร้าวได้มากกว่า

#### การแต่งสีและการเคลือบผิวพอร์ซเลน (staining and glazing the porcelain) (Phillips,1991)

พอร์ซเลนที่ใช้ทำครอบฟันหรือฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่นชนิดต่าง ๆ มักจะต้องแต่งสีและเคลือบทับเพื่อให้มีองค์เหมือนฟันธรรมชาติ อุณหภูมิที่ใช้เคลือบจะถูกลดลงโดยเติมกลาสมอดิฟายเออร์ และกลาสมอดิฟายเออร์นี้จะมีความทนทานต่อสารเคมีน้อยกว่าปกติ การเติมสีจะต้องทำการเคลือบทับซึ่งก็เป็นปัญหาเกี่ยวกับความทนทานต่อสารเคมี อย่างไรก็ตามการเคลือบที่ดีต้องมีความทนทานเพียงพอ

วิธีที่จะทำให้สีที่เติมอยู่ได้นานทำได้โดยเติมสีภายใน (internal staining) โดยนิยมทำเส้นรอยแตกของชั้นเคลือบฟันและลักษณะอื่น ๆ ไว้ภายในมากกว่าทาไว้ที่ผิว ซึ่งจะทำได้เหมือนธรรมชาติมากกว่า แต่ข้อเสียของการแต่งสีภายในคือจะต้องกระเทาะพอร์ซเลนออกแล้วทำใหม่ในกรณีที่สีไม่เหมือน

พอร์ซเลนที่เคลือบแล้วมักจะแข็งแรงมากกว่าที่ยังไม่เคลือบ ตาราง 2-3 การเคลือบผิวจะลดรอยแตก ถ้ามีการกรอผิวเคลือบออก กำลังตัดขวาง (transverse strength) จะลดลงครึ่งหนึ่ง

การสังเกตถึงลักษณะทางคลินิก ภายหลังจากขัดชิ้นงานในปากแล้ว ทันตแพทย์อาจแก้ไขการสบ ฟันโดยการกรอผิวพอร์ซเลน อาจทำให้ความแข็งแรงลดลงได้

ตารางที่ 2-3 แสดงโมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture) ของพอร์ซเลนชนิดต่าง ๆ

CLASSIFICATION	FIRING ATMOSPHERE	SURFACE CONDITION	MODULUS OF RUPTURE	
			MPa	psi
Porcelain*	Air	Ground	75.8	11,000
		Glazed	141.1	20,465
	Vacuum	Ground	79.6	11,547
		Glazed	132.3	19,187
Aluminous porcelain	Air	Ground	135.9	19,709
		Glazed	138.9	20,142
Fused alumina			519.3	75,310

\*A dental porcelain. Both porcelains are the medium temperature maturing variety and fused in air. Adapted from McLean and Hughes, Br Dent J, Sept. 21, 1965.

ความมันที่ดูเหมือนธรรมชาติของชิ้นงานทำได้โดยการเคลือบผิว 1 ใน 2 วิธี และเพิ่มเติมด้วยการขัดแต่ง การเคลือบผิวทั้ง 2 วิธีนั้นคือ การเคลือบผิวแบบธรรมชาติ (natural glaze) และการเคลือบผิวโดยทาน้ำยาเคลือบผิวโอเวอร์เกรซ (overglaze) (DeVreugd และ Eissmann,1980) ซึ่งก่อนหน้านี้อาจใช้คำว่าเคลือบผิวชนิดเซวเกรซ (self-glaze) (McLean,1979; Yamamoto,1985) แทนคำว่าเคลือบผิวแบบธรรมชาติ และ แอปพลายเกรซ (applied glaze) แทนคำว่า โอเวอร์เกรซ (Kuwata,1980)

### 1. การเคลือบผิวแบบธรรมชาติ (Naylor,1992)

หมายถึงชิ้นงานที่ถูกเผาที่อุณหภูมิเท่าหรือสูงกว่าอุณหภูมิเผาเริ่มต้นเล็กน้อย ถ้าชิ้นงานจะทำการเคลือบผิวแบบธรรมชาติ ชิ้นงานจะถูกเผาหลังจากทาสารแต่งสีเรียบร้อยแล้วตามคำแนะนำของบริษัทสำหรับเทคนิคการเคลือบแบบธรรมชาติ ขั้นแรกควรนำชิ้นงานไปทำให้แห้ง โดยการยื่นเข้าไปรับความร้อนที่ปากเตาเผาจนกระทั่งตัวกลางที่ผสมสารแต่งสีระเหยจนหมด ทิ้งให้แห้งผิวที่ได้จะมีลักษณะคล้ายซอด้ก แล้วจึงนำชิ้นงานใส่ในเตาเผา ๑ และเผาตามอุณหภูมิเคลือบผิวแบบธรรมชาติที่บริษัทแนะนำ เมื่อถึงอุณหภูมิแล้วอาจนำชิ้นงานออกจากเตาทันทีหรือทิ้งไว้ในเตาที่อุณหภูมิเคลือบผิวประมาณ 1-2 นาที จนกระทั่งผิวด้านนอกมีลักษณะมันเงา ผิวของพอร์ซเลนควรจะถูกเผาในอุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะทำให้ผิวพอร์ซเลนเชื่อมเข้าด้วยกันจนเกิดความเรียบและมีผิวที่มันเงา ขั้นตอนนี้จะไม่ใช้การเผาชนิดสูญญากาศ แต่ใช้อยู่ที่ความดันบรรยากาศ ระหว่างเผานี้ผิวของพอร์ซเลนจะหลอมเหลวและเชื่อมกันเพียงพอที่จะถมผิวที่ขรุขระเพียงเล็กน้อยหรือรูพรุนเล็ก ๆ ผลคือจะทำให้ผิวเรียบและเป็นผิวที่เคลือบมัน การทำการเคลือบแบบธรรมชาตินี้จะขึ้นกับอุณหภูมิที่เผา ถ้าอุณหภูมิสูงหรือเผานานขึ้นจะทำให้ผิวเรียบมากขึ้น

ซึ่งอุณหภูมิและเวลาในการเผานี้จะเลือกตามชนิดของพอร์ซเลน โดยขึ้นกับอุณหภูมิที่ทำให้หลอมตัวและส่วนเหลวที่อยู่ในพอร์ซเลน ถ้าเผานานเกินไปหรืออุณหภูมิสูงมากเกินไป จะทำให้พอร์ซเลนเสียคุณสมบัติ (undergo pyroplastic flow) ชิ้นงานจะเสียรูปร่าง เกิดการตกผลึกใหม่ และมีสีทึบขึ้น (devitrify) การเปลี่ยนแปลงนี้อาจมีผลต่อส่วนที่เป็นนม เช่น นมทางด้านใกล้กลางและใกล้กลางของฟันตัดหน้า ทำให้คุณสมบัติเสียรูปร่าง และควรระวังสีจะเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่นด้วย พอร์ซเลนที่มีฟลักซ์ (flux) จำนวนมาก (เช่น ใช้ส่วนเหลวมากที่อุณหภูมิสูง) ก็จะเกิดปัญหานี้ได้ ดังนั้นช่างทันตกรรมควรจะต้องเลือกอุณหภูมิเผาตามชนิดของพอร์ซเลนที่ใช้ พอร์ซเลนส่วนใหญ่อุณหภูมิเผาที่ใช้มักจะเป็นการเผานานประมาณ 2 นาที ในงานชิ้นใหญ่ เช่น ฟันปลอมบางชิ้นชนิดที่ติดแน่นที่มีขนาดยาวจะใช้เวลาเผานานกว่าชิ้นงานเล็ก ๆ

เมื่อพยายามใช้ช่วงเวลากการเผาที่เหมาะสมที่สุดควรระวังการเผาน้อยเกินไป ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากกว่าเผามากเกินไปด้วย ถ้าเผาน้อยเกินไปแล้วสามารถแก้ไขได้โดยใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อยหรือขยายเวลาในการเผาให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเคลือบผิวมากเกินไปในการเผาครั้งแรก สามารถแก้ไขได้โดยการกรอผิวออกและเคลือบผิวใหม่

## 2. การเคลือบผิวโดยวิธีโอเวอร์เกรซ (overglaze technique)

ถ้าชิ้นงานมีการแต่งเติมด้วยการแต่งสีภายนอกเพิ่มมาก หรือเลือกขอบของชิ้นงานเป็นพอร์ซเลนและไม่ต้องการใช้อุณหภูมิสูงในการเผาแบบธรรมชาติ เพราะจะทำให้เสียรูปร่างของขอบและสีที่แต่งไว้เสียไป ควรใช้การโอเวอร์เกรซ สำหรับเซรามิกวีเนียร์ (ceramic veneer) การโอเวอร์เกรซนี้จะเป็นเพียงชั้นพอร์ซเลนใสและบางซึ่งทำให้เกิดความมันเงาของชิ้นงาน โอเวอร์เกรซจะเป็น ผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสุกต่ำ (low temperature maturing porcelain) กว่าผงทำเนื้อฟัน (body porcelain) ประมาณ 20-60 องศาเซลเซียส

ถ้าเลือกการแต่งสีเพิ่มและใช้แอปพลายเกรซ ควรเลือกเทคนิคใดเทคนิคหนึ่งจาก 2 วิธีนี้คือ วิธีที่ 1 เผาส่วนที่แต่งเพิ่มที่อุณหภูมิเผาก่อน ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วท้าน้ำยาเคลือบผิวทับบนสารแต่งสีแล้วนำไปเผาอีกครั้ง แม้ว่าวิธีนี้จะใช้เวลานานมากกว่าอีกวิธีเนื่องจากต้องเผา 2 ครั้ง แต่ก็ดีคือสีที่แต่งเพิ่มจะหลุดออกยากกว่าซึ่งถ้าสีหลุดไปแล้วจะทำให้สีเปลี่ยนได้ วิธีที่ 2 ทำส่วนพอร์ซเลนให้ขึ้นด้วยน้ำยาทาเคลือบที่ใส (clear overglaze) มากกว่าที่จะใช้สารเคลือบผิวในวิธีแรก โดยแต่งสีบนผิวพอร์ซเลนโดยตรงก่อนแล้วทำให้เปียกด้วยน้ำยาทาเคลือบที่ใส ชั้นแรกของน้ำยาทาเคลือบที่ใส จะถมส่วนที่เป็นรูพรุนและทำให้ผิวมีความชื้นเหมือนกันเพื่อให้ได้สีที่ถูกต้อง นำชิ้นงานไปวางที่ปากเตาเผาก่อนและเผาที่อุณหภูมิเผาเคลือบผิวตามที่กำหนดสำหรับแอปพลายเกรซ

นำไปเผาที่เตาเผาที่มีอากาศ ควรระวังเพราะวัสดุที่ใช้อาจไปปิดหลุมหรือพื้นผิวบางบริเวณทำให้มีลักษณะที่ไม่เหมือนธรรมชาติ หรืออาจทำให้สีเปลี่ยนไป

#### **การขัดทางกล (mechanical polish)**

ทั้ง ๆ ที่การเคลือบผิวจะทำให้ดูเหมือนธรรมชาติเป็นที่ยอมรับได้แล้วก็ตาม แต่การทำให้ชิ้นงานดูเหมือนจริงอาจทำได้เพิ่มขึ้นโดยการใช้วิธีการขัดทางกลช่วย ภายหลังจากเคลือบผิวแล้วทั้งชนิดเคลือบแบบธรรมชาติหรือโอเวอร์เกรซ อย่างน้อยที่สุดการขัดทางกลก็จะกำจัดส่วนขรุขระเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่เกิดจากการทำ โอเวอร์เกรซ และช่วยให้ผิวเรียบขึ้นได้ ที่สำคัญกว่าคือการขัดจะช่วยทำให้ผิวที่มันเงามากเกินไปของพอร์ซเลนที่เคลือบผิวแล้วดูเหมือนธรรมชาติและเหมือนเคลือบฟันมากขึ้น โดยใช้หินฟัมมิสและเทคนิคแบรสโซ (Brasso technique) และครีมกากเพชรสำหรับขัดพอร์ซเลน (diamond polishing paste; Insta-glaze) แต่ควรระวังในการขัดเพราะอาจทำให้สีที่แต่งไว้หลุดได้

#### **คุณสมบัติของพอร์ซเลน (properties of fused porcelain) (Criag, 1993)**

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอร์ซเลนจากขั้นตอนการทำคือ ผู้ทำและระดับของการอัดแน่น (condensation หรือ compaction) ผงพอร์ซเลนที่เป็นรูปร่างก่อนเผา และอุณหภูมิของการเผาและขั้นตอนภายหลังพอร์ซเลนเชื่อมเป็นก้อนแล้ว

คุณสมบัติมักจะหมายถึงการหดตัวตามยาวและปริมาตร (linear and volumetric shrinkage) กำลังตัดขวาง (transverse strength) และแรงโน้มถ่วงที่เฉพาะของก้อนพอร์ซเลนที่เผาแล้ว การหดตัวตามยาวของพอร์ซเลนที่เคลือบผิวแล้วของผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสุกต่ำ (low temperature maturing porcelain) 14% และของผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสุกสูง (high temperature maturing porcelain) 11.5% การทำโอเวอร์เกรซจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงมากขึ้นในผงพอร์ซเลนทั้ง 2 ชนิด และการหดตัวของปริมาตรจะแตกต่างกันมากถึง 8% โดยผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสุกต่ำ 32-37% และของผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสุกสูง 28-34% ส่วนผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสุกกลาง (medium temperature maturing porcelain) จะอยู่ระหว่างผง 2 ชนิดนี้ การควบคุมการอัดแน่นและเทคนิคการเผาที่ดีจะช่วยชดเชยการหดตัวในระหว่างการทำชิ้นงานพอร์ซเลนได้

เทคนิคการทำมีผลต่อความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของก้อนพอร์ซเลนที่เผาแล้วน้อยกว่าคุณสมบัติอื่น และมีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างผงพอร์ซเลนชนิดอุณหภูมิเผาสุกสูง

และต่ำ ความด่างจำเพาะของก้อนพอร์ซเลนที่เผาแล้วที่ปรากฏจะมีค่า 2.2-2.3 ในขณะที่ค่าจริงประมาณ 2.4 และมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างยี่ห้อ

ความแข็งแรงทางด้านขวาง (transverse strength) อยู่ระหว่าง 62-90 เมกกะปาสคาล ค่าความแข็งแรงเฉือน (shear strength) 110 เมกกะปาสคาล และความแข็งแรงดึง (diametral tensile strength) ต่ำกว่า 34 เมกกะปาสคาล กำลังอัด (compressive strength) ประมาณ 172 เมกกะปาสคาล โมดูลัสของความยืดหยุ่น (elastic modulus) 69 จิกะปาสคาล และความแข็งผิวของนूप (Knoop hardness) 460 ก.ก./ม.ม.<sup>2</sup>

คุณสมบัติทางด้านความร้อนของพอร์ซเลน หมายถึงการนำความร้อน (conductivity) 0.0030 แคลอรี/วินาที/ซ.ม.<sup>2</sup> (องศาเซลเซียส/ ซ.ม.) การกระจายความร้อน (diffusivity) 0.64 ม.ม.<sup>2</sup>/วินาที และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิตามยาว (linear thermal coefficient of expansion)  $12.0 \times 10^{-6}$ /องศาเซลเซียส

#### คุณสมบัติทางกายภาพของฟันพอร์ซเลนเมื่อเทียบกับฟันอะคริลิกหรือฟันธรรมชาติ

ค่าความแข็งผิวของพอร์ซเลนเทียบกับฟันธรรมชาติและฟันอะคริลิกแสดงในตารางที่ 2-4 พบว่าพอร์ซเลนมีความแข็งผิวมากกว่า ความต้านทานในการสึกของฟันพอร์ซเลนจะมีเท่ากับหรือมากกว่าฟันธรรมชาติ และมากกว่าฟันอะคริลิก 10-20 เท่า

ตารางที่ 2-4 แสดงความแข็งผิวของฟันธรรมชาติและฟันปลอม

วัสดุ	ค่าความแข็งผิวของนूप (ก.ก./ม.ม. <sup>2</sup> )
พอร์ซเลน	460
ผิวเคลือบฟัน	343
เนื้อฟัน	68
อะคริลิก	20

พอร์ซเลนจะต้านทานต่อการละลายได้ มีเพียงกรดไฮโดรฟลูออริก ที่จะมีผลต่อพอร์ซเลน ส่วนอะคริลิกจะต้านการแตกร้าวได้ และด้านการละลายได้บ้างแต่มิฉะนั้นเมื่อใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvents)

การฟอกสีและแสงอาทิตย์ไม่มีผลกับพอร์ซเลนแต่การทำให้แห้งและใส่น้ำทำให้เปียกซ้ำหลาย ๆ ครั้งจะทำให้เกิดการขีดข่วนและสีหายไปในพื้นที่อะคริลิก การโดนแสงอุลตราไวโอเล็ตในพื้นที่อะคริลิกจะทำให้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองขึ้น หรือเมื่ออะคริลิกนํ้าขึ้นจากตัวทำละลาย สีที่เป็นสารอินทรีย์จะหลุดออกมาผิวออกทำให้สีเปลี่ยนไป

พื้นที่อะคริลิกจะมีความแข็งแรงอัด (impact strength) สูงกว่า แม้ว่าการเผาในสุญญากาศจะเพิ่มความต้านทานต่อการแตกหักเพิ่มขึ้นได้ถึง 50% แต่ก็ไม่สามารถป้องกันการแตกหักจากการกระแทกทันทีได้

มิติเสถียรภาพ (dimensional stability, permanence of form) ของพื้นพอร์ซเลนสูงกว่าพื้นที่อะคริลิก พื้นที่อะคริลิกสามารถรองรับแรงบดเคี้ยวโดยเลี่ยงการแตกหักจากความเปราะได้ แต่ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้และเมื่อใช้ไปเป็นระยะเวลาอันนานมิติเสถียรภาพจะหมดไป

พื้นพอร์ซเลนและอะคริลิกจะทนต่อความร้อนได้ดีเพียงพอที่จะใช้งานได้ โดยพื้นพอร์ซเลนจะทนความร้อนได้ถึง 1,100 องศาเซลเซียสถ้าค่อย ๆ เพิ่มความร้อนอย่างช้า ๆ ส่วนพื้นที่อะคริลิก จะทนความร้อนได้ประมาณ 200 องศาเซลเซียส

#### **คุณสมบัติทางทัศนศาสตร์ (optical properties) (Craig,1993)**

สีของพอร์ซเลนที่ใช้ผสมอยู่ในช่วงสีเหลืองถึงเหลืองแดง ถ้ามีสีต่างไปจากนี้ต้องใช้ชุดพอร์ซเลนที่ใช้ในการแต่งสีเพิ่ม ซึ่งจะมีสีเข้มตั้งแต่สีน้ำเงิน เหลือง ชมพู ส้ม น้ำตาล และเทา โดยเติมลงบนพอร์ซเลนชนิดทึบแสง (opaque) หรือพอร์ซเลนที่ทำส่วนเนื้อฟัน (body) ระหว่างก่อรูปพอร์ซเลน การทำการแต่งสีที่ผิวจะเป็นการเปลี่ยนสีของกรอบฟันและมีการใช้การเคลือบผิวทับเม็ดสี ข้อเสียของการแต่งสีเพิ่มคืออยู่ได้ไม่นาน เนื่องจากมีการละลายตัวสูงและลดความโปร่งแสง

ความโปร่งแสงเป็นคุณสมบัติหนึ่งของพอร์ซเลน ความโปร่งแสงของชั้นทึบแสง ชั้นเนื้อฟัน และชั้นเคลือบฟันแตกต่างกัน ชั้นทึบแสงจะมีค่าความโปร่งแสงต่ำสุดเพื่อปิดสีของโลหะ ชั้นเนื้อฟันมีค่า 20-35% ตามตารางที่ 2-5 ชั้นเคลือบฟันมีค่าสูงสุดระหว่าง 45-50%

ตารางที่ 2-5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของการผ่านของแสง (transmission) ที่ความหนา  
พอร์ซเลน 1 มม.

	Shade	Ceramco	Vita	Neydium	Will-Ceram	Steeles
	59	29.97	22.66	31.93	26.06	27.23
	62	27.85	—	—	27.88	—
	65	23.31	20.39	35.39	33.50	22.10
	67	26.32	18.04	23.58	19.03	23.42
	91	31.81	—	38.41	—	—

Adapted from Brodbelt RHW, O'Brien WJ, Fan PL: *J Dent Res* 59:70, 1980.

ผิวเคลือบฟันในฟันธรรมชาติจะมีการเรืองแสงเมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเลตในพอร์ซเลน จึงได้มีการนำยูเรเนียมออกไซด์มาใช้ผสมด้วย พอร์ซเลนชั้นนอกจะมีความโปร่งแสงดั่งนั้นสีภายในจะสะท้อนออกมาจากชั้นทึบแสงหรือส่วนแกนของพอร์ซเลน ดังนั้นสีจึงเกิดจากผลการผสมระหว่างแสงที่สะท้อนออกมาจากชั้นทึบแสงภายในและแสงที่ผ่านทะลุส่วนเนื้อฟันลงไปได้ ความหนาของส่วนเนื้อฟันจะมีผลต่อสีได้ ความหนาจะไม่มีผลมากนักถ้าสีของชั้นทึบแสงและเนื้อฟันเป็นสีเดียวกันในระบบเดียวกัน

พอร์ซเลนชนิดเคลือบบนผิวของกรอบโลหะ (porcelain fused to metal)

ควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ (Craig, 1993)

1. มีลักษณะเหมือนฟันธรรมชาติ โดยมีส่วนเนื้อที่มีความมันเงาคล้ายแก้ว (glassy matrix) และมีเฟสที่เป็นผลึก (crystalline phase) ซึ่งจะทำให้เกิดความโปร่งแสง และมีเม็ดสีและสารทึบแสงเพื่อแต่งสีและปิดสีโลหะ ทำให้ดูเหมือนฟันธรรมชาติให้มากที่สุด
2. หลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อให้โลหะที่รองรับมีการบิดเบือนน้อยที่สุด โซเดียมและโปแตสเซียมออกไซด์ในส่วนเนื้อ (glassy matrix) จะเป็นตัวลดอุณหภูมิหลอมเหลวลงให้อยู่ในช่วง 930-980 องศาเซลเซียส
3. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิใกล้เคียงกับโลหะ การขยายตัวจะสูงขึ้นเมื่อเค็มโปแตสเซียมออกไซด์เกิดเป็นเฟสที่มีการขยายตัวสูง เรียกว่า เลิวไซต์ (leucite)

4. อยู่ในช่องปากได้โดยไม่มีอันตราย ไม่เกิดการสึกกร่อน (corrosion) เมื่อสัมผัสกับน้ำในช่องปาก แข็งแรงเพียงพอเมื่อนำไปใช้ในด้านบุคคล

### พันธะระหว่างพอร์ซเลนกับโลหะ (bonding between metal and porcelain)

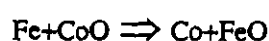
กลไกการเชื่อมระหว่างพอร์ซเลนและโลหะในกรณีนี้เป็นการเกิดการเชื่อมกันระหว่างทองผสมกับพอร์ซเลน แบ่งเป็น การเชื่อมกันทางกล (mechanical) ทางเคมี (chemical) เคนไดรท์ (dendritical) ทรานซิชันเฟส (transition phase) และแรงวันเดอวาลส์ (Van der waal's forces) (Yamamoto,1985)

#### 1. การเชื่อมกันทางกล

โดยพื้นฐานแล้วการเชื่อมกันทางกลจะเป็นการยึดกัน (interlocking bond) บนผิวระหว่างโลหะกับแก้ว และเพราะว่าความแข็งแรงของการเชื่อมในบริเวณผิวจะมากกว่าความแข็งแรงของตัวแก้วเอง แสดงว่าการเชื่อมกันนี้ไม่ได้มาจากความแข็งแรงจากการยึดกันทางกลเพียงอย่างเดียว

การทำให้ผิวขรุขระโดยการกรอหรือการเป่าทรายจะช่วยเพิ่มแรงยึดโดยพอร์ซเลนไหลลงไปตามรอยขรุขระของผิวโลหะ ทำให้เกิดการเชื่อมกันทางกล ส่วนความแข็งแรงของการเชื่อมกันอย่างอื่นจะได้จากความขรุขระทางจุลภาค ที่เกิดจากออกซิเดชันบนผิวโลหะ, การกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical erosion) ของผิวโลหะจากแก้วที่หลอมเหลว การเลือกเกิดออกซิเดชันของขอบของเกรน (grain boundaries) การกัดโดยกรดก่อนการเตรียมการหลอมเชื่อมติดกัน การตกตะกอนของผลึกเคนไดรท์ (dendritic crystal) ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกไซด์โลหะที่อยู่ในแก้ว การเกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีโดยแก้วสามารถอธิบายได้โดยเปรียบเทียบกับเครื่องเคลือบ (enameled ironware) ดังนี้

โดยปกติโลหะที่มีค่า (high noble) จะแทนที่โลหะไม่มีค่า (low noble) ในภาวะปฏิกิริยาอิมิตัว ในแก้วที่หลอมเหลวก็เช่นกัน ดังนั้นนิเกิลออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ที่อยู่ในเฟสที่เป็นแก้วจะถูกแทนที่ด้วยเหล็กที่ละลายเข้าสู่เฟสที่เป็นแก้วและตกตะกอนลงบนผิวของโลหะ ทำให้เกิดการเชื่อมกันเกิดขึ้นดังรูป ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ



ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมระหว่างพอร์ซเลนกับโลหะด้วย สามารถเห็นได้เมื่อนำโลหะที่มีการเชื่อมด้วยพอร์ซเลนแล้วใช้กรดละลายพอร์ซเลนออกไปด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก พบ



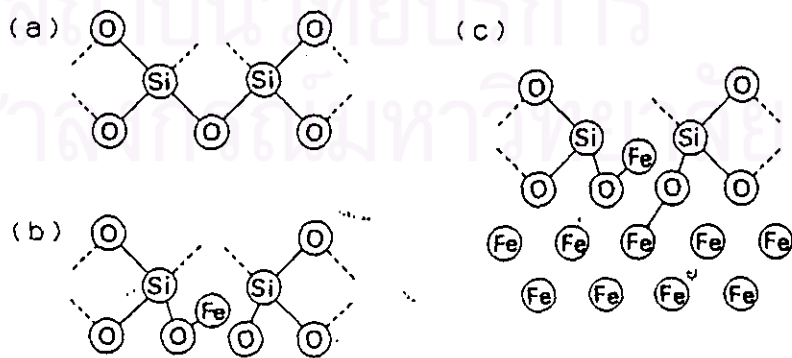
ว่าพอร์ซเลนที่หลอมภายใต้ความร้อนจะทำลายขอบเขตรูปร่างเกรนของโลหะตลอดจนทำให้เกิดพื้นผิวที่หยาบขรุขระคล้ายผลึกรูปร่างไม่แน่นอนขนาดประมาณ 0.1-1.0 ไมครอน

เมื่อมีการทำการหลอมเชื่อมพอร์ซเลนบนผิวเหล็กด้วยวิธีการหลอมเชื่อมแบบแห้ง (dry fusing) เกิดออกไซด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของผิวเหล็กละลายเข้าสู่แก้วที่หลอมและตกตะกอนเป็นเหล็กชนิดอัลฟา ( $\alpha$  Iron) บนพื้นผิวนั้น ผลึกที่ตกตะกอนบนผิวเหล็กนี้เรียกว่าเดนไดรต์ ดังนั้นเดนไดรต์จะเป็นสายขีดยึดจากผิวโลหะเข้าไปในส่วนเฟสที่เป็นแก้วทำการยึดทั้ง 2 เฟสเข้าด้วยกัน ประกอบเป็นส่วนหนึ่งของการเชื่อมกันทางกลเรียกว่า การเชื่อมกันด้วยเดนไดรต์ (dendritical bond) อย่างไรก็ตามการเชื่อมกันด้วยเดนไดรต์ เป็นส่วนเล็กน้อยจนอาจไม่ถูกยอมรับในระบบพอร์ซเลนเชื่อมกับโลหะเพราะโลหะผสมพวกอะเมเตอร์ (Amator) ซีรามโก (Ceramco) และวี 4 (V4) ซึ่งกล่าวว่ามีเดนไดรต์ไม่แข็งแรงไปกว่าดีกูเด็นท์ (Degudent) หรือ ฮีราดอร์ (Herador) ซึ่งอาจพูดได้ว่าไม่มีเดนไดรต์ที่เชื่อมกับพอร์ซเลน ยิ่งกว่านั้นพบว่าเดนไดรต์ในโลหะผสมพวกวี 4 จะหายไประหว่างการเผาพอร์ซเลน

## 2. การเชื่อมกันทางเคมี

เกิดจากโลหะและแก้วเชื่อมผิวเข้าด้วยกันโดยการยึดอิเล็กตรอนเกิดแรงยึดขึ้น พลังงานของการยึดกันนี้จะสมดุลย์เมื่อเฟสที่เป็นแก้วถูกอึดตัวด้วยเหล็กออกไซด์ ( $FeO$ )

ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของแก้วจะรวมตัวเป็นโครงสร้างซิลิกาเตตระฮีดรอล (tetrahedral silica structure) โดยอะตอมของซิลิกอนจะอยู่ตรงกลางและล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนซึ่งโครงสร้างจะอยู่ซ้อนทับกันและเชื่อมแต่ละตัวในแบบ 3 มิติ โดยยึดอะตอมออกซิเจนตัวปลายตรงมุมเป็นโครงสร้างตาข่าย (network structure) ดังรูป A



รูปที่ 2-1 แสดงกลไกการเชื่อมกันทางเคมีระหว่างแก้วและเหล็ก

ถ้าออกไซด์ของเหล็กซึ่งอยู่บนผิวละลายในแก้วที่หลอมเหลวก็จะทำตัวเป็นตาข่ายกับออกไซด์ส่วนที่เพิ่มเติม (accessory oxide) ซึ่งค่าโคออดิเนชัน (coordination number) ของออกซิเจนที่อยู่รอบซิลิกอนในตาข่ายแก้วคือ 4 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไป (แสดงว่ามีความเสถียรสูงมาก) แต่การเกิดออกไซด์ของเหล็กจะเพิ่มจำนวนอะตอมของออกซิเจนซึ่งไม่เข้าไปจับ (cross link) กับซิลิกอนทำให้ลดการเกิดการข้ามไปจับของอะตอมออกซิเจน ทำให้โครงสร้างตาข่ายที่ได้คล้ายตัวออกและลดพลังงานภายในลง ดังรูป B (แสดงว่ามีความเสถียรลดลง)

ถ้าเฟสที่มีพลังงานภายในต่ำมีไปชิดกับโลหะ การเชื่อมระหว่างแก้วกับโลหะจะง่ายขึ้น มีการเพิ่มอนุมูลอิสระ (free radical) โดยตัดการเชื่อมของออกซิเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงตาข่ายและอนุมูลอิสระของออกซิเจนจะเกิดการเชื่อมทางเคมีกับโลหะได้ ดังรูป C

เชื่อกันว่าการเชื่อมทางเคมีที่แข็งแรงจะเกิดเมื่อมีโครงสร้างที่ต่อเนื่องของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวระหว่างโลหะกับแก้วและแก้วที่หลอมเหลวถูกทำให้อึดด้วยออกไซด์ของเหล็กที่ละลายในแก้วบริเวณพื้นผิวรอยต่อนั้น ขณะเดียวกันก็จะเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนมากที่สุด

การเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวรอยต่อของพอร์ซเลนและโลหะก็เช่นเดียวกัน ออกไซด์ของโลหะพวกดีบุก อินเดียม และเหล็กที่เกิดจากการเลือกเกิดออกซิเดชันบนผิวโลหะที่ผ่านการเผาเพื่อให้เกิดออกไซด์จะมีกลไกเหมือนกล่าวก้าวข้างต้น คือ ละลายเข้าด้วยกันด้วยซิลิกาและออกไซด์ของโลหะในพอร์ซเลนเพื่อให้เกิดการเชื่อมผ่านอะตอมของออกซิเจน

ถ้าออกไซด์ของเหล็กละลายในแก้วก่อน ความแข็งแรงของการเชื่อมกันทางเคมีที่มีมากขึ้นจะเกิดจากมีเหล็กเพิ่มในแก้วเกิดความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamic equilibrium) ที่รอยเชื่อมต่อแต่ความสมดุลอยู่ได้ไม่นาน หลังเกิดการละลายเหล็กออกไซด์จะซึมลึกไปในเฟสที่เป็นแก้วเนื่องจากมีการละลายตัวสูงของเหล็กในแก้ว การเชื่อมทางเคมีที่แข็งแรงจะเกิดขึ้นเมื่อเหล็กออกไซด์ในเฟสที่เป็นแก้วสัมผัสกับเหล็กที่อยู่ในสภาพสมดุลและเมื่ออุณหภูมิที่ผิวที่เชื่อมกันหลังเอาแก้วที่หลอมติดกับเหล็กออก จะเกิดการสึกกร่อนของผิวโลหะมากกว่าเมื่อเทียบกับการหลอมเชื่อมกันที่ไม่มีออกไซด์เกิดขึ้น

การละลายของออกไซด์ของโลหะในแก้วบนผิวโลหะจะมีผลเหมือนโลหะและพอร์ซเลน ในโลหะมีค่าส่วนใหญ่จะมีออกไซด์น้อยต้องเติมพวกดีบุก อินเดียม และเหล็ก ซึ่งจะให้ออกไซด์ขณะเผาโลหะเพื่อให้เกิดออกไซด์แล้วมีผลต่อการเชื่อมกันที่ดีขึ้น มีการทดลองสนับสนุนว่าถ้าพอร์ซเลนชั้นที่บดแสงที่มีสแตนนัสออกไซด์เกาะกับโลหะที่ให้สแตนนัสออกไซด์จะ

ทำให้ยึดกันดีขึ้น ซึ่งถ้าชั้นทึบแสงมีออกไซด์เหมือนกับโครงสร้างผลึกของออกไซด์โลหะพื้นฐานบนผิวโลหะ โลหะและพอร์ซเลนจะมีการเชื่อมกันที่แข็งแรงโดยมีการเชื่อมเอาออกไซด์เข้าด้วยกัน (Miyagawa,1978 คัดลอกจาก Yamamoto,1985) ดังนั้นอาจมีการเติมออกไซด์เพิ่มเพื่อให้เกิดความสมดุลย์ที่ออกไซด์ที่เติมเข้าไปทั้งในส่วนของโลหะและพอร์ซเลนเพื่อให้โครงสร้างผลึกในแก้วเหมือนกับออกไซด์บนผิวของโลหะ

ตัวอย่างเช่น โคบอลต์ออกไซด์จะเพิ่มเข้าไปเพื่อให้เกิดการเชื่อมระหว่างเหล็กและแก้ว คือเมื่อแก้วที่หลอมติดกับผิวเหล็กที่เกิดออกซิไดซ์ออกไซด์จะเริ่มละลายในแก้ว เวลาที่ใช้นี้จะขึ้นกับความหนาของชั้นออกไซด์ ระหว่างนี้ออกไซด์และแก้วจะเกิดความสมดุลย์ที่บริเวณผิวเชื่อมต่อการเชื่อมที่ดีจะต้องการความสมดุลย์นี้ หลังจากที่มีการละลายของออกไซด์โมเลกุลสุดท้าย เหล็กออกไซด์จะซึมลึกเข้าไปในแก้วเป็นผลให้ลดความเข้มข้นของเหล็กที่ผิวเชื่อมต่อให้ต่ำกว่าความเข้มข้นของสภาพสมดุลย์ ถ้าไม่มีอะตอมออกซิเจนเพิ่มเติมจากที่อื่น ดังนั้นการเพิ่มโคบอลต์ออกไซด์จะเป็นตัวทดแทนและมีผลเมื่อการละลายของออกไซด์สมบูรณ์แล้ว

โคบอลต์จะมีค่าน้อยกว่าเหล็กในตารางธาตุ โคบอลต์ออกไซด์จะทำให้เกิดเซลล์เฉพาะที่ที่สร้างความขรุขระบนผิวของเหล็กเนื่องจากเกิดการสึกกร่อนจากไฟฟ้าเคมี (ซึ่งเกี่ยวกับการเชื่อมกันทางกล) และลดโลหะที่ตกตะกอนบนผิวเหล็กและเกิดชั้นของโลหะผสมซึ่งจะปล่อยอะตอมออกซิเจนจากโคบอลต์ออกไซด์ไปรวมกับเหล็กที่ไม่เกิดปฏิกิริยาบนผิวของเหล็ก เกิดเหล็กออกไซด์ละลายในแก้วและคงสภาพความสมดุลย์ไว้ป้องกันไม่ให้ความเข้มข้นของเหล็กออกไซด์บนแก้วต่ำ ถ้าเติมโคบอลต์ออกไซด์ประมาณ 0.5 % จะเกิดการตกตะกอนของผลึกที่คล้ายเข็มที่ผิวเชื่อมต่อ ถ้ามากกว่านี้เกิดการตกตะกอนของเดนไดรต์ เดนไดรต์ก็จะมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงทางกล (หรือการเชื่อมกันโดยเดนไดรต์)

### 3. การเชื่อมกันจากทรานซิชั่นเฟส

เป็นการเชื่อมกันทางอ้อมระหว่างแก้วและโลหะผ่านชั้นกลาง (intermediary layer) ประกอบด้วยสารในรูปออกไซด์ที่ยังไม่ละลายตัวอยู่บนผิวของโลหะ ซึ่งอาจเป็นชนิดหนึ่งของการเชื่อมกันทางเคมีที่อยู่ในขั้นระหว่างกลาง (intermediate stage) ถ้าผิวออกไซด์ที่มีการละลายตัวสูงในแก้วเกิดขึ้นได้ ออกไซด์ทั้งหมดจะซึมเข้าแก้วระหว่างการหลอม แต่ในขั้นระหว่างกลางของปฏิกิริยาเป็นการยากที่จะเกิดปฏิกิริยาการหลอมเชื่อมกันได้จนหมด จึงยังคงมีออกไซด์ที่ไม่ละลายหลงเหลือและทำปฏิกิริยาเกิดการเชื่อมได้ การเชื่อมกันระหว่างพอร์ซเลนและโลหะจึงหมายรวมถึงการเชื่อมที่เกิดจากชั้นทรานซิชั่นเฟสด้วย ปกติชั้นออกไซด์จะมองเห็นด้วยตาได้บนโลหะชนิดมีค่า

(precious metal) หลังการละลายอย่างสมบูรณ์แล้วโดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริกแต่ถ้าใช้กรดไฮโดรฟลูออริกล้างพอร์ซเลนซึ่งเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติเป็นเวลานาน จะไม่มีชั้นออกไซด์เหลืออยู่ให้เห็นเนื่องจากถูกกำจัดออกไปหมด หรืออาจเนื่องจากออกไซด์ที่เกิดมีการละลายตัวไปในแก้วจะหมดอย่างช้า ๆ และอิมพัลส์ทำให้เหลือออกไซด์ที่จะเกิดการเชื่อมน้อยเกินไป

สิ่งสำคัญในทรานซิชันเฟสนี้คือความแข็งแรงของการเชื่อมระหว่างออกไซด์และโลหะ และความแข็งแรงของชั้นออกไซด์ ในโลหะผสมที่มีค่าจะเกิดชั้นออกไซด์บาง แน่น แข็งแรง จึงเกิดการเชื่อมที่แข็งแรง ส่วนโลหะกึ่งมีค่า พาเลเดียม เงิน หรือโลหะไม่มีค่าจะมีชั้นออกไซด์ที่อ่อนแอกว่า พวกโลหะไม่มีค่าจะมีการขยักตัว (exfoliation) ของชั้นออกไซด์ตรงกลางชั้นออกไซด์หรือระหว่างชั้นของออกไซด์กับโลหะ จึงทำให้เกิดการแตกหักของชั้นออกไซด์ได้ง่ายกว่า

4. การเชื่อมกันจากการดึงดูดกันของโมเลกุล (molecular attraction หรือ Van der wall's forces)

เป็นแรงที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างอะตอม 2 อะตอมที่เข้าใกล้กันโดยที่อยู่ในช่วงที่ไม่สามารถเกิดการเชื่อมกันทางเคมีได้ แต่เป็นแรงที่อ่อนมาก แต่เนื่องจากการเชื่อมกันทางเคมีจะเกิดเมื่อระยะทางระหว่างโลหะและพอร์ซเลนอยู่ใกล้กันมากซึ่งระยะทางดังกล่าวก็จะมีผลทำให้แรงจากวันเดอร์วาลเกิดได้มากขึ้นจนมีนัยสำคัญนับเป็นการเกิดการเชื่อมกันได้

## โลหะผสมที่ใช้กับฟอร์ซเลน

โลหะผสมที่ใช้กับฟอร์ซเลนได้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้คือ (Naylor,1992)

1. เกิดออกไซด์ที่ผิวได้เพื่อที่จะเชื่อมกับฟอร์ซเลน (chemical bonding) เช่น โลหะผสมไม่มีตระกูล (base metal alloy) จะมีส่วนประกอบหลักที่เป็นโลหะผสมไม่มีตระกูล (nonnoble) ซึ่งสามารถเกิดออกไซด์ได้เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นขณะเผาในเตาเผา ส่วนโลหะผสมมีตระกูล (noble) จะไม่สามารถเกิดออกไซด์ได้ จึงจำเป็นต้องเติม base metal alloy ในส่วนประกอบด้วยเล็กน้อย
2. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิสูงกว่าของฟอร์ซเลนเล็กน้อย (ประมาณ  $13.5-15.5 \times 10^{-6}$  นิ้ว/นิ้ว/องศาเซลเซียส) (McClean,1979) เพื่อให้เกิดการยึดกันของโลหะและฟอร์ซเลน, แม้ว่าโลหะกับฟอร์ซเลนจะยึดกันได้ด้วยพันธะทางเคมี แต่ถ้ามีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิไม่ใกล้เคียงกันแล้วจะทำให้ฟอร์ซเลนกระเทาะแตกหักได้
3. มีช่วงของการหลอมเหลวสูงกว่าช่วงของการหลอมเหลวของฟอร์ซเลน อุณหภูมินี้ควรแยกจากกันอย่างชัดเจน เพื่อให้ฟอร์ซเลนสามารถเผาได้ในอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสมและสามารถเคลือบผิวได้โดยไม่ต้องกลัวว่าจะมีการบิดเบี้ยวหรือหลอมเหลวของโครงโลหะ
4. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะเผาฟอร์ซเลนที่อุณหภูมิสูง ก็มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (high temperature strength) และมีความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อย (sag resistance)
5. ใช้งานได้ง่าย มีขั้นตอนที่ไม่ต้องอาศัยความชำนาญมากนัก เช่น สามารถหลอมเหลวได้ง่าย เหยียงได้ง่ายและมีความเที่ยงตรง ชัดแต่งและขัดมันได้ง่ายเป็นต้น
6. ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (biocompatible) สามารถใช้งานได้โดยปลอดภัย ทั้งช่างทันตกรรม ทันตแพทย์ และผู้ป่วย
7. ไม่ทำให้ฟอร์ซเลนมีการเปลี่ยนสี แม้ว่าสีจะไม่มีผลทางชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่ก็เป็นสิ่งที่ทันตแพทย์และผู้ป่วยต้องการ เช่น เมื่อใช้โลหะผสมที่มีส่วนประกอบของทองน้อยลง และใช้โลหะที่มีราคาถูกลงกว่าแทน เช่น เงิน หรือ พาลาเดียม สีเหลืองจะหายไป และเงินที่ผสมอยู่จะทำให้ฟอร์ซเลนเปลี่ยนเป็นสีออกเขียวได้ในฟอร์ซเลนบางชนิด กลไกการเปลี่ยนสีนี้เกิดจากการแลกเปลี่ยนระหว่างเงินจากโลหะผสมและไฮเดียมจากฟอร์ซเลน (Bertolotti,1988)

ชนิดของโลหะผสมเมื่อแบ่งตามส่วนประกอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ดังนี้คือ (Naylor,1992)

1. โลหะผสมมีตระกูล (noble metal alloys) ได้แก่

- ทอง แพลตินัม พาเลเดียม
- ทอง พาเลเดียม เงิน แบ่งเป็นกลุ่มที่มีเงินปริมาณมาก (high silver) และ น้อย (low silver)
- ทอง พาเลเดียม
- พาเลเดียม เงิน
- พาเลเดียม (high palladium) ผสมกับ โคบอลท์ หรือ ทองแดง หรือ ทอง และเงิน

## 2. โลหะผสมไม่มีตระกูล (base metal alloys) ได้แก่

- นิเกิล โครเมียม ที่มีเบอริลเลียม และ ไม่มีเบอริลเลียม
- โคบอลท์ โครเมียม
- ระบบอื่น ๆ ได้แก่ ไททาเนียม

ซึ่งโลหะผสมแต่ละชนิดมีส่วนประกอบและข้อดีข้อเสียดังนี้คือ

### ทอง แพลตินัม พาเลเดียม

เป็นโลหะผสมที่ใช้กันมานาน แต่ในปัจจุบันนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีราคาแพง (ในบางชนิดจะไม่มีพาเลเดียมเป็นส่วนประกอบจึงเป็นโลหะผสมชนิดทองแพลตินัม )

ส่วนประกอบ ทอง 75-88% พาเลเดียม น้อยกว่า 11% แพลตินัม น้อยกว่า 8% เงิน น้อยกว่า 5%(ถ้ามี) และมีโลหะพวกอินเดียม เหล็กและดีบุกเพื่อให้เชื่อมกับพอร์ซเลนได้ (ถ้ามีพาเลเดียมมากกว่าแพลตินัมจะเรียก ทอง พาเลเดียม แพลตินัม)

ข้อดี เหนียวได้ง่าย เชื่อมกับพอร์ซเลนได้ดี ง่ายต่อการกรอและการขัดแต่ง มีคุณสมบัติความมีตระกูลสูง (high nobility level) ด้านต่อการเกิดการสึกกร่อนและผิวเปลี่ยนสีได้ดี ไม่เป็นอันตรายกับเนื้อเยื่อ บางชนิดจะมีสีเหลือง เทคนิคในการทำงานง่าย (no technique sensitive) สามารถรีดขอบได้ (burnishable)

ข้อเสีย มีราคาสูง มีความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยต่ำไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ยาวหรือฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่น ความแข็งผิวต่ำมีการสึกสูง มีความหนาแน่นสูงจึงต้องใช้โลหะปริมาณมาก

### ทอง พาเลเดียม เงิน

โลหะผสมชนิดนี้ทำขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดของทอง แพลตินัม พาเลเดียม ที่มีความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยต่ำ ความแข็งผิวต่ำและราคาแพง โดยเพิ่มเงินเข้ามาแทนแพลตินัม

โดยมีทั้งมีเงินปริมาณมากและน้อย แต่ก็ยังมีคุณสมบัติที่คล้ายกับทอง แพลตินัม พาเลเดียมเนื่องจากมีทองเป็นส่วนประกอบหลัก

#### กลุ่มที่มีเงินเป็นส่วนประกอบปริมาณมาก

ส่วนประกอบ ทอง 39-53% พาเลเดียม 25-35% เงิน 12-22% และมีโลหะที่ให้ออกไซด์เป็นส่วนประกอบเหมือนทอง แพลตินัม พาเลเดียม

ข้อดี ราคาถูกกว่าทอง แพลตินัม พาเลเดียม พัฒนาการความแข็งและความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยให้เพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติความมีตระกูลสูง

ข้อเสีย มีเงินเป็นส่วนประกอบมากอาจทำให้ฟอร์ซเลนเปลี่ยนสี ราคาสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิสูง ความต้านทานต่อการสึกกร่อนและเปลี่ยนสีที่ผิวต่ำ

#### กลุ่มที่มีเงินเป็นส่วนประกอบปริมาณน้อย

ส่วนประกอบ ทอง 52-77% พาเลเดียม 10-33% เงิน 5-12% และโลหะที่ให้ออกไซด์

ข้อดี ราคาถูกกว่าทอง แพลตินัม พาเลเดียม พัฒนาการความแข็งและความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยให้เพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติความมีตระกูลสูง และมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนและเปลี่ยนสีที่ผิว

ข้อเสีย มีเงินเป็นส่วนประกอบอาจทำให้ฟอร์ซเลนเปลี่ยนสีแต่น้อยกว่ากลุ่มที่มีเงินปริมาณมาก ราคาสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิสูง

#### ทอง พาเลเดียม

โลหะผสมกลุ่มนี้พัฒนาขึ้นเนื่องจากข้อเสียของเงินในกลุ่มทอง แพลตินัม เงิน และกลุ่มพาเลเดียม เงิน ที่ทำให้ฟอร์ซเลนมีสีเปลี่ยนและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิสูงเกินไป โลหะชนิดนี้มีสีขาวของแพลตินัมซึ่งเป็นที่นิยมใช้มาก แต่ยังคงมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิไม่เข้ากับฟอร์ซเลนที่มีการขยายตัวสูง

ส่วนประกอบ ทอง 44-55% พาเลเดียม 35-45% แกลเลียม น้อยกว่า 5% อินเดียม และดีบุก 8-12% ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทอง 51.1% พาเลเดียม 38.5% แกลเลียม 5% และมีอินเดียมและดีบุกเล็กน้อย

ข้อดี เหนียวได้ง่าย เชื่อมกับฟอร์ซเลนได้ดี ด้านต่อการเกิดการสึกกร่อนและผิวเปลี่ยนสีได้ดี พัฒนาการความแข็งผิวและความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยให้เพิ่มขึ้น มีความหนาแน่นต่ำ

**ข้อเสีย** สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิไม่เข้ากับพอร์ซเลนที่มีการขยายตัวสูง และมีราคาสูง

### พาลเลเดียม เงิน

เป็นโลหะผสมที่ไม่มีทองเป็นส่วนประกอบ แต่มีพาลเลเดียมเป็นส่วนประกอบหลัก ทำให้ราคาสูงมากกว่ากลุ่มที่มีทองเป็นส่วนประกอบ

ส่วนประกอบ โดยทั่วไปประกอบด้วยพาลเลเดียม 60% ที่เหลือเป็นเงิน และมีอินเดียมกับดีบุกเป็นส่วนประกอบ สำหรับพาลเลเดียม เงินที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะมี 2 ชนิดที่มีส่วนประกอบแตกต่างกันคือ ชนิดแรกจะมีพาลเลเดียม 55-60% เงิน 28-30% และอินเดียมกับดีบุก ชนิดที่ 2 จะมีพาลเลเดียม 50-55% เงิน 35-40% ดีบุกและโลหะอื่น ๆ แต่มีอินเดียมเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย

**ข้อดี** เหยียงได้ง่าย (เมื่อใช้วิธีการเผาด้วยเครื่องพ่นไฟ) เชื่อมกับพอร์ซเลนได้ดี ด้านต่อการเกิดการสึกกร่อนและผิวเปลี่ยนสีได้ดี ความแข็งผิวและความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยสูง เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีความยาว มีความหนาแน่นต่ำ ราคาต่ำกว่ากลุ่มที่มีทองเป็นส่วนประกอบ มีคุณสมบัติความมีตระกูลอยู่ในระดับปานกลาง ความแข็งผิวต่ำ สามารถรีดขอบได้

**ข้อเสีย** ทำให้พอร์ซเลนบางชนิดมีสีเปลี่ยนไปเป็นสีเหลือง น้ำตาลหรือเขียว (แต่มีพอร์ซเลนประมาณ 10 ชนิดที่สามารถต้านการเปลี่ยนสีของพอร์ซเลนจากผลของโลหะเงินได้ (Naylor, 1988) อาจมีปัญหาในการเหยียงเมื่อใช้วิธีเหนียวนำด้วยไฟฟ้า (induction casting) พาลเลเดียมและเงินมีแนวโน้มที่จะดูดซึมก๊าซ เมื่อใช้แล้วต้องมีการทำความสะอาดเผาพอร์ซเลนอย่างดีเพื่อไม่ให้มีเงินตกค้างอยู่ ทำให้เกิดออกไซด์อยู่ภายในทำให้มีปัญหาในการเชื่อมกับพอร์ซเลน ไม่สามารถใช้ครุชเบิ้ล (crucible) ที่ทำจากคาร์บอนได้ และต้องใช้อินเวสเมนต์ที่ไม่มีคาร์บอนและฟอสเฟต มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิสูงมาก

### กลุ่มพาลเลเดียม (high palladium)

ชนิดที่มีส่วนประกอบของทองแดงจะเป็นที่นิยมใช้มากกว่าชนิดที่มีส่วนประกอบของโคบอลต์ มีบางบริษัทเติมโลหะมีตระกูลเช่นทองหรือแพลตินัมประมาณ 1-2% ลงไปด้วยเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของเกรนของโลหะกลุ่มนี้

### พาลเลเดียม โคบอลต์

ส่วนประกอบ พาลเลเดียม 78-88% โคบอลต์ 4-10% อาจมีทองผสมด้วย 2% และมีโลหะที่ให้ออกไซด์ เช่นแกเลียมและอินเดียม



**ข้อดี** หลอมและเหยียงได้ง่าย มีความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยช้อยสูง มีความหนาแน่นต่ำจึงใช้ทองปริมาณน้อยกว่าทอง ชัดได้ง่ายใกล้เคียงกับการขัดทอง พาเลเดียม เชื่อมโลหะ (presolder) ได้ง่ายกว่าชนิดที่ผสมทองแดง

**ข้อเสีย** ต้องใช้กับพอร์ชเลนที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิสูง มีแนวโน้มที่จะเผาจนความร้อนสูงเกินไป (over-heating) มากกว่าชนิดที่ผสมทองแดง เกิดออกไซด์ที่หนาและมีสีดำทำให้พอร์ชเลนมีสีออกน้ำเงิน มีแนวโน้มที่จะดูดซึมก๊าซ มีรายงานในการใช้งานในคลินิกระยะยาวนาน

#### พาเลเดียม ทองแดง

**ส่วนประกอบ** พาเลเดียม 70-80% ทองแดง 9-15% ทอง 1-2% (ถ้ามี) แพลตินัม 1% (ถ้ามี) (บางชนิดเท่านั้นที่มีทองและแพลตินัมเป็นส่วนประกอบประมาณ 1-3%) และมีโลหะที่ให้ออกไซด์ได้แก่แกดเลียม อินเดียม และดีบุก

**ข้อดี** เหยียงได้ง่าย เข้ากับพอร์ชเลนได้หลายชนิด ด้านต่อการเกิดการสึกกร่อนและผิวเปลี่ยนสีได้ดี มีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูกกว่ากลุ่มทอง โลหะเพียง 1 ก้อน (ingot) ก็สามารทำงานได้

**ข้อเสีย** เกิดออกไซด์ที่หนาและมีสีดำทำให้พอร์ชเลนมีสีออกเทา จะต้องใช้การดูแลเพื่อประเมินว่าสีของชั้นออกไซด์เหมาะสมที่จะใช้หรือไม่ ไม่ควรใช้ครุซิบิลที่ทำจากคาร์บอนในการเหยียงด้วยเครื่องเหยียงไฟฟ้า มีแนวโน้มที่จะดูดซึมก๊าซ เกิดการคืบเมื่อได้รับความร้อนสูงทำให้ขอบของชิ้นงานอ้าได้ ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีความยาวมาก มีรายงานในการใช้งานในคลินิกระยะยาวนาน ชัดแต่งได้ยาก การเชื่อมโลหะทำได้ยาก ความแข็งผิวสูงมาก

#### พาเลเดียม เงิน ทอง

**ส่วนประกอบ** พาเลเดียม 75-86% เงิน น้อยกว่า 1-7% ทอง 2-6% แพลตินัม น้อยกว่า 1.0% (ถ้ามี) และโลหะให้ออกไซด์ ได้แก่อินเดียมและแกดเลียม

**ข้อดี** ราคาถูก มีความหนาแน่นต่ำ พัฒนาการต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยช้อยได้ดีขึ้นทำให้ความแข็งแรงดีกว่าเมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูง สีของชั้นออกไซด์อ่อนกว่าผสมโลหะอื่นในกลุ่มนี้

**ข้อเสีย** มีแนวโน้มที่จะดูดซึมก๊าซ มีรายงานในการใช้งานระยะยาวนาน ไม่ควรใช้กับครุซิบิลที่ทำจากคาร์บอน

## โลหะกลุ่มไม่มีตระกูล

### นิเกิล โครเมียม

เป็นโลหะที่สร้างขึ้นเนื่องจากมีราคาถูกมากกว่ากลุ่มโลหะมีตระกูล ใช้ทำกรอบฟันและฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่นได้ (Bertolotti,1988) แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดที่ผสมกับเบอริลเลียมและไม่มี เบอริลเลียม ซึ่งชนิดที่มีเบอริลเลียมจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่า นิเกิล โครเมียม เบอริลเลียม

ส่วนประกอบ นิเกิล 62-82% โครเมียม 11-20% เบอริลเลียม น้อยกว่า 2% และมีโลหะอื่นผสมหลายชนิดโดยไม่จำกัดชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม คาร์บอน แกลเลียม เหล็ก แมงกานีส โมลิบดีนัม ซิลิกอน ไททาเนียม และ/หรือ วานาเดียม

ข้อดี ราคาถูกมาก มีความหนาแน่นต่ำ มีความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยสูง สามารถเหวี่ยงส่วนที่บางได้ นำความร้อนต่ำ สามารถใช้กรัดกัดได้

ข้อเสีย ไม่สามารถใช้กับผู้ป่วยที่แพ้ nickel ได้ เบอริลเลียมที่มีในส่วนผสมอาจเป็นอันตรายต่อช่างทันตกรรมและผู้ป่วย การหลอมโลหะและการเหวี่ยงต้องมีการฝึกฝนที่ดี การเชื่อมกับพอร์ซเลนด้วยชั้นออกไซด์ทำได้ยาก มีความแข็งผิวสูงมากอาจทำให้ฟันคู่สบสึกได้ การเชื่อมโลหะทำได้ยาก กรอตัดชิ้นงานหลังยึดด้วยซีเมนต์ได้ยาก

### นิเกิล โครเมียม

ส่วนประกอบ นิเกิล 62-77% โครเมียม 11-22% อาจมีโบรอนบ้าง และ เหล็ก โมลิบดีนัม ไนโอเบียม(หรือโคลัมเบียม) และ/หรือ แทนทาลัม

ข้อดี ไม่มีเบอริลเลียมเป็นส่วนประกอบทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ราคาถูก มีความหนาแน่นต่ำ

ข้อเสีย ไม่สามารถใช้กับผู้ป่วยที่แพ้ nickel ได้ ใช้กรัดกัดไม่ได้ เหวี่ยงได้ไม่ดีเท่า นิเกิล โครเมียม เบอริลเลียม มีออกไซด์มากกว่านิเกิล โครเมียม เบอริลเลียม

### โคบอลต์ โครเมียม

เป็นโลหะที่สร้างขึ้นเนื่องจากมีราคาถูกกว่ากลุ่มโลหะมีตระกูลเช่นกัน ส่วนประกอบหลักเป็นโคบอลต์ อาจแบ่งได้เป็นโลหะที่มีรูธเนียมผสมและไม่มีรูธเนียมผสม แต่ความแตกต่างระหว่างโลหะผสมทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่เด่นชัด โลหะกลุ่มนี้มีใช้ไม่มากเท่ากลุ่มนิเกิล โครเมียม เบอริลเลียม แต่ก็มีข้อดีคือไม่มีนิเกิลและเบอริลเลียมที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้ (Colington et al,1985 ;Morris,1987 ; Smith and Williams,1982)

ส่วนประกอบ โคบอลต์ 53-68% โครเมียม 25-34% โลหะอื่น ๆ ได้แก่ โมลิบดีนัม รูทีเนียม (อาจมีหรือไม่มี) และ/หรือ วอลแฟรม (wolfram)

ข้อดี ไม่มีนิเกิลและเบอริลเลียมผสม นำความร้อนต่ำ ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก

ข้อเสีย ทำงานได้ยากกว่าใช้โลหะกลุ่มนิเกิล ความแข็งผิวสูงอาจทำให้ฟันคู่สบสึก มีออกไซด์มากกว่ากลุ่มนิเกิล ไม่มีการศึกษาในระยะยาว

### โลหะกลุ่มอื่น ๆ

ได้แก่โลหะผสมไททาเนียมและอื่น ๆ แต่ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายในท้องตลาด การวิจัยเกี่ยวกับไททาเนียมกำลังเป็นที่สนใจและจับตามองอยู่ แต่ยังมีปัญหาในการใช้งานที่ยู่ยากและไม่เชื่อมกับพอร์ซเลน

### หลักในการเลือกโลหะผสมสำหรับใช้ในงานพอร์ซเลน (Bertolotti, 1988)

จะขึ้นกับการพิจารณาความสมดุลระหว่างราคาและคุณสมบัติของโลหะ ในกรอบฟัน 1. ซึ่ง คุณสมบัติเช่นความแข็งแรง ความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยจะไม่สำคัญเท่าในงานฟันปลอมบางส่วนถอดได้ชนิดติดแน่น คุณสมบัติการเหวี่ยง การเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ความต้านทานต่อการสึกกร่อนและการเปลี่ยนสีที่ผิว สีของพอร์ซเลน และความแข็งผิวจะสำคัญในทั้งกรอบฟันซี่เดียวหรือฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่น ในฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่น การเชื่อมโลหะ ความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อย ความแข็งแรง โมดูลัสของความยืดหยุ่นจะมีความสำคัญเพิ่มขึ้นมากเมื่อชิ้นงานมีความยาวมากขึ้น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของพอร์ซเลนควรที่จะเพิ่มตามความยาวของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น

เมื่อราคาไม่ใช่ปัจจัยตัวหลักจะสามารถเลือกโลหะได้กว้างขึ้น การเลือกโลหะผสมที่ดีที่สุดขึ้นกับหลายปัจจัยรวมถึงชนิดของพอร์ซเลนที่ใช้ด้วย อาจเลือกใช้กลุ่มที่มีทองเป็นส่วนประกอบหลักจำนวนมาก หรือเลือกทอง พาเลเดียม ซึ่งชนิดหลังจะลดราคาลงได้ 30-40 % ถ้าจะเลือกโลหะผสมเพียงอย่างเดียวสำหรับงานทุกอย่าง ทอง พาเลเดียม เป็นกลุ่มที่น่าเลือกมากที่สุด เพราะคุณสมบัติทั้งทางกลและกายภาพดี ไม่มีอันตรายต่อเนื้อเยื่อ ราคาปานกลาง เข้ากับพอร์ซเลนได้ เหวี่ยงได้ง่ายและมีเงินเป็นส่วนผสมอยู่น้อยกว่า 5 % ซึ่งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของพอร์ซเลน

ทอง พาเลเดียม เงิน เทียบกับ ทอง พาเลเดียม ได้ในเรื่องราคา แต่มีปัญหาเรื่องพอร์ซเลนเปลี่ยนสีเนื่องจากมีเงินเป็นส่วนประกอบ 10-15 % ดังนั้นโลหะที่ไม่มีเงินเป็นส่วนประกอบหรือมีน้อยจะดีกว่า

เมื่อราคาเป็นปัจจัยหลัก พาลเดียม เงิน ,พาลเดียม ทองแดง และนิกเกิล โครเมียม เบอริลเลียมจะเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เมื่อคู่ที่แรงงานและราคาจะใกล้เคียงกัน นิกเกิล โครเมียม เบอริลเลียมจะเป็นตัวเลือกสำหรับชิ้นงานที่มีความยาวและต้องการคุณสมบัติในการเหวี่ยงสูงหรือต้องการความสวยงามเป็นสิ่งสำคัญ แต่จะมีปัญหาเรื่องเป็นพิษกับผู้ใช้ได้

พาลเดียม เงิน มีคุณสมบัติในการทำงานในคลินิกดี แต่อาจมีการเปลี่ยนสีของพอร์ซเลนได้ ผลการใช้งานในระยะยาวดี

พาลเดียม ทองแดง มีข้อดีคล้ายพาลเดียม เงิน แต่การหลอมเหลวและการเหวี่ยงจะยากกว่าเล็กน้อย มีความแข็งแรงมาก สามารถใช้แทนพาลเดียม เงินได้แต่จะต้องมีประสบการณ์ในการใช้พอสมควรและมีเทคนิคการเชื่อมโลหะที่ดี

ความแข็งผิวและความอ่อน (ductility) จะมีความสำคัญเมื่อพิจารณาใช้โลหะเป็นด้านบดเคี้ยวหรือเป็นฟันหลักในงานพอร์ซเลนบางส่วน (partial veneer abutment) การเลือกโลหะผสมจะจำกัดมากขึ้น

โลหะผสมที่ควรเลือกสำหรับงานฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่นคือ

1. นิกเกิล โครเมียม เบอริลเลียม
2. พาลเดียม เงิน
3. ทอง พาลเดียม ที่มีเงินเป็นส่วนประกอบน้อย

โลหะผสมที่ไม่ควรเลือกสำหรับงานฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่นคือ

1. โลหะที่มีทองเป็นส่วนประกอบมาก (โดยเฉพาะมีสีเหลืองมาก) เนื่องจากราคาแพง ความแข็งแรงต่ำและความต้านทานต่อการทุดหรือห้อยย้อยต่ำ
2. พาลเดียม ทองแดง เนื่องจากการเชื่อมโลหะยาก
3. ทอง พาลเดียม เงิน เนื่องจากราคาและผลต่อสีพอร์ซเลน
4. นิกเกิล โครเมียม ไม่มีเบอริลเลียม เนื่องจากเหวี่ยงได้ยาก

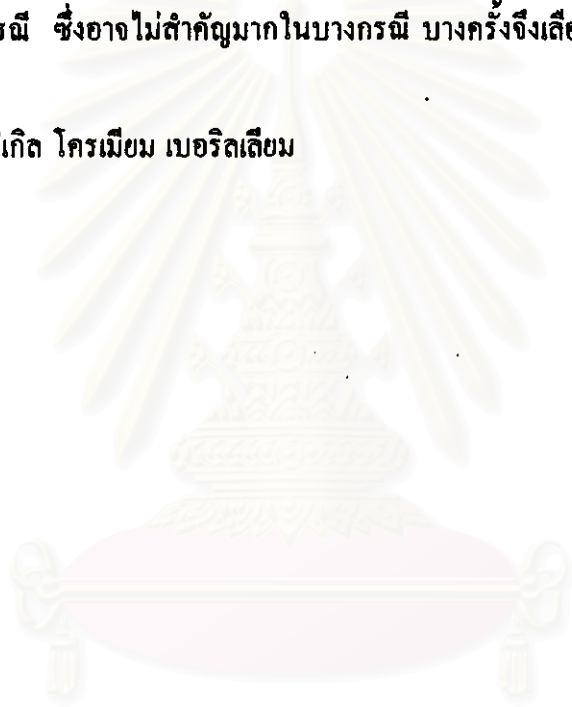
โลหะผสมที่ควรเลือกสำหรับงานครอบฟันซี่เดียวหรือฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่นที่สั้นคือ

1. พาลเดียม ทองแดง
2. พาลเดียม เงิน
3. นิกเกิล โครเมียม เบอริลเลียม

#### 4. ทอง พาเลเดียม อาจมีเงินผสมด้วยเล็กน้อย

โลหะผสมที่ไม่ควรเลือกสำหรับงานครอบฟันซี่เดี่ยวหรือฟันปลอมบางส่วนชนิดติดแน่นที่สั้นคือ

1. ทอง พาเลเดียม เงิน เนื่องจากราคาและผลที่มีต่อสีฟอร์ชเลน
2. โลหะที่มีทองเป็นส่วนประกอบมาก เนื่องจากราคา แต่โลหะทองผสมที่มีสีเหลืองมากจะมีสีฟอร์ชเลนที่ดีกว่าเนื่องจากชั้นออกไซด์จะถูกปิดสีได้ด้วยฟอร์ชเลน ทำให้ได้ชั้นทึบแสง (opaque) ที่บางและสวยงามกว่า แต่ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการทรุดหรือห้อยย้อยไม่เพียงพอในบางกรณี ซึ่งอาจไม่สำคัญมากในบางกรณี บางครั้งจึงเลือกใช้โลหะกลุ่มนี้ในงานครอบฟันซี่เดี่ยว
3. นิกเกิล โครเมียม เบอร์ลิเทียม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบของผิวพอร์ซเลน

ความเรียบของผิวพอร์ซเลนมีผลจากปัจจัยหลายอย่าง เริ่มตั้งแต่การเตรียมโลหะรองรับพอร์ซเลน (metal substructure) การพอกพอร์ซเลน การนำพอร์ซเลนไปเผา ซึ่งจะทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อพอร์ซเลนได้ (McLean,1979 ; Rosenstiel และคณะ,1988) นอกจากนี้ในขั้นตอนการลงชิ้นงานในผู้ป่วย การเลือกใช้หัวขัด ลำดับขั้นตอนการขัด แรง ความเร็ว และเวลาที่ใช้ในการขัดก็มีผลต่อความเรียบของผิวพอร์ซเลนภายหลังการกรอแต่งสูงเช่นกัน

#### 1. การเตรียมโลหะรองรับพอร์ซเลน (Yamamoto,1985)

การที่ผิวโลหะมีลักษณะขรุขระมาก มีร่องลึกและมีรอยคอดจะทำให้มีอากาศไปค้างอยู่หรือมีก๊าซเกิดขึ้นระหว่างการเผาจะกลายเป็นฟองอากาศ เมื่อพอร์ซเลนที่หลอมเหลวไม่สามารถไหลลงไปเชื่อมกับร่องที่ลึกได้จะเกิดฟองอากาศขึ้น ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 960 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันที่ลดลงเพียงพอในเตาเผาที่มาตรฐาน ก๊าซจะขยายเป็นปริมาตร 80-85 เท่า ใหญ่กว่าที่ความดันปกติและอุณหภูมิปกติตามกฎของบอยล์และชาร์ล (Boyle-Charles' law) วิธีการขัดที่ทำให้ได้ผิวเรียบไม่มีร่องลึก ฟองอากาศหรือรอยคอดเป็นวิธีที่ควรทำ

ถ้ามีสิ่งใดที่ทำให้เกิดก๊าซได้ที่รอยเชื่อมต่อของโลหะจะทำให้เกิดฟองอากาศจากการเผาได้ สิ่งนั้นอาจเป็นไขมันและผิวหนังที่สัมผัสโลหะจากมือของช่างทันตกรรมระหว่างการกรอแต่งโลหะ สารอินทรีย์เช่นขี้ผึ้งและน้ำมันที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ หัวกรอโลหะเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ โดยทั่วไปหัวกรอที่ใช้กรอโลหะเกิดจากการขีดผกขัด (abrasive particle) เข้าด้วยกัน เช่นซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) อลูมินัมออกไซด์ (aluminum oxide) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide) โดยขีดกับเซรามิก ซีเมนต์ เบคไลต์ โพลีไวนิล อีทกอสฮัล ยางหรือแก้ว และทำให้อยู่ในรูปร่างที่ต้องการ ระหว่างการกรอแต่งถ้ามีส่วนของหัวกรอฝังอยู่ในผิวโลหะจะทำให้เกิดก๊าซระหว่างเผา มีฟองอากาศเกิดขึ้น

Kashiwase (1978) (คัดลอกจาก Yamamoto,1985) รายงานเกี่ยวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเตรียมผิวโลหะและการเกิดฟองอากาศโดยใช้โลหะมีค่ากรอด้วยหัวกรอต่าง ๆ ได้แก่ หัวขัดซิลิโคน (silicone point) หัวขัดคาบอรัณดัม (carborundum point) หัวขัดเซรามิก (ceramic point) หัวกรอทรงกระบอก (fissure bur) หัวกรอคาร์ไบด์ (carbide bur) การเป่าด้วยเม็ดแก้วขนาด 30 ไมครอน ภายหลังการกรอด้วยหัวขัดคาบอรัณดัม และการเป่าด้วยผงอลูมินาขนาด 30 ไมครอน แล้วพอกผงพอร์ซเลนบนผิวทันทีหลังกรอแต่ง ภายหลังเผาแล้วลดความหนาของพอร์ซเลนอีก 0.5 มม. แล้วนำไปเคลือบผิวโดยใช้พอร์ซเลนชนิดโปร่งแสง (transparent

porcelain) พบว่า หัวขัดซิลิกอนจะเกิดผิวขรุขระน้อยที่สุด แต่มีฟองอากาศจำนวนมากที่สุดเนื่องจากไม่สามารถทำให้พอร์ซเลนสัมผัสกับโลหะได้เพราะมียางที่เป็นส่วนประกอบของหัวขัดเหลืออยู่ที่ผิวและเกิดก๊าซปริมาณมากขณะเผา ถ้าไม่มีการเผาโลหะก่อนการพอกพอร์ซเลน (degas) ไม่ควรเลือกใช้หัวขัดซิลิกอน ส่วนหัวขัดคาบอรัลคัมและหัวขัดเซรามิกทำให้เกิดผิวขรุขระมาก มีฟองอากาศมากและมีขนาดใหญ่ ผงของคาบอรัลคัมแข็งมากแต่หลุดออกจากกันได้ง่าย ทำให้ไปติดบนผิวโลหะเมื่อนำไปเผาผงซิลิกอนคาร์ไบด์จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ wettability ของพอร์ซเลนบนผงซิลิกอนคาร์ไบด์ต่ำ จึงเกิดฟองอากาศได้ง่าย เมื่อกรอด้วยหัวกรอทรงกระบอกหรือหัวกรอคาร์ไบด์ จะลดฟองอากาศได้โดยเฉพาะหัวกรอคาร์ไบด์เพราะมีการสึกของผงหัวขัดต่ำ ทำให้ปูนเนียนบนผิวน้อยจึงเกิดก๊าซน้อยด้วย ผิวที่ได้มีความขรุขระน้อยกว่าหัวขัดคาบอรัลคัมและหัวขัดเซรามิกซึ่งมีขนาดผงหัวขัดที่หยาบและขรุขระ การกรอจึงเป็นการทำให้เกิดผิวฉีกเป็นริ้วมากกว่าเรียบ ยิ่งถ้าใช้หัวกรอที่ก็จะทำให้เกิดริ้วของโลหะมากขึ้นและเปิดทางทำให้เกิดช่องว่างหรือรอยคอด สารแปลกปลอมและก๊าซจะเข้าไปอยู่ในบริเวณนี้ทำให้เกิดฟองอากาศได้ การทำการเป่าทรายหลังกรอด้วยหัวขัดคาบอรัลคัมจะลดความหยาบลงได้แต่ไม่มีผลต่อการป้องกันไม่ให้เกิดฟองอากาศ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของผงที่ใช้เป่าจะมีขนาดใหญ่กว่าร่องที่เกิดจากการกรอด้วยหัวขัดคาบอรัลคัม เมื่อเป่าบนผิวแล้วจะทำให้ผิวเรียบได้มากขึ้นแต่ก็อาจปิดทางออกของสารปนเปื้อนหรืออากาศที่อยู่ภายในได้ เมื่อเผาจะทำให้ก๊าซขยายใหญ่และทะลุส่วนที่ปิดกั้นนั้นขึ้นมาได้ ผิวที่กรอด้วยหัวกรอทรงกระบอกหรือหัวกรอคาร์ไบด์จะมีความขรุขระและรอยคอดหรือช่องว่างน้อยเพราะมีหัวตัดที่มีความแข็ง ฟองอากาศเล็ก ๆ อาจเกิดขึ้นได้บ้างจากสิ่งปนเปื้อนบนผิวโลหะ หัวกรอนี้จึงเหมาะที่จะใช้กรอโลหะที่จะเชื่อมกับพอร์ซเลน การใช้หัวกรอทรงกระบอกจะมีฟองอากาศมากกว่าการใช้หัวกรอคาร์ไบด์เนื่องจากมีความแตกต่างกันในเรื่องคุณภาพการตัดและรูปร่างของหัวตัด ส่วนตัดของหัวกรอทรงกระบอกจะตั้งฉากกับแนวในการกรอและจับผิวโลหะมาก ยากต่อการเกิดริ้วรอยหรือขรุขระที่เกิดจากร่องขวางของหัวกรอ แต่หัวคาร์ไบด์จะแข็งและใบมีดตัดเรียบเป็นมุมโดยตรงกับการกรอ จะตัดเรียบและลดความขรุขระของผิวเนื่องจากทำให้เกิดฟองอากาศน้อยและประสิทธิภาพการขัดสูงโดยหัวกรอที่มีใบตัดแนวเดียวจะดีกว่ามีใบตัดขวางตัดกัน

โลหะไม่มีค่าจะมีความแข็งมาก การเกิดรอยคอดและช่องว่างจะเกิดยาก การใช้วิธีการเป่าทรายที่มีความหยาบและขรุขระของผงอลูมินาจะทำให้มีการยึดติดกับพอร์ซเลนได้ดีด้วยวิธีทางกล เนื่องจากชั้นของออกไซด์ของโลหะชนิดนี้ไม่แข็งแรงและไม่สามารถคาดหวังการเชื่อมติดด้วยพันธะทางเคมีได้

หัวกรอกากเพชรได้นำเข้ามาใช้เมื่อเร็ว ๆ นี้แต่ไม่เหมาะสมเนื่องจากกรอแล้วได้ผิวขรุขระเหมือนที่กรอด้วยหัวขัดคาบอรั้นคัม หรือ หัวขัดเซรามิก และอาจเกิดการปนเปื้อนกับโลหะที่ใช้ขัดผงขัดได้แก่ นิกเกิล ทองแดง หรือเงินได้

## 2. การพอกพอร์ซเลน

ถ้าควบคุมการอัดแน่นของผงพอร์ซเลนได้ไม่ดี (porcelain condensation) จะเกิดรูพรุนได้สูง เป็นผลให้ผิวพอร์ซเลนไม่เรียบ (Yamamoto,1985) การอัดแน่นผงพอร์ซเลนเป็นขั้นตอนที่ทำให้ผงพอร์ซเลนก่อนเผาอัดตัวแน่นด้วยตัวเอง เมื่อผงเข้ามาชิดกันมาก ๆ อากาศและความชื้นที่อยู่ระหว่างผงพอร์ซเลนจะเคลื่อนออกไปที่ผิว ส่วนเหลวและอากาศที่เหลืออยู่นี้เป็นตัวที่ทำให้เกิดความพรุน (ฟองอากาศ) ในเนื้อพอร์ซเลนที่เผาแล้ว (Naylor,1992)

ความพรุนที่เกิดขึ้นจะทำให้ชิ้นงานไม่แข็งแรงและไม่สวยงาม ช่องอากาศที่มีจะทำให้ขาดสีและความโปร่งแสง เพราะเมื่อแสงผ่านวัสดุที่โปร่งแสงแล้วไปพบกับช่องอากาศจะทำให้แสงเกิดการกระจายไปทุกทิศทางมากกว่าที่จะผ่านลงไป ในบริเวณนั้นทั้งหมด ทำให้ชิ้นงานเกิดลักษณะทึบ ขุ่นมัวมากกว่าโปร่งแสง ทำให้มีลักษณะขาดสีไป

ข้อดีของการอัดแน่นผงพอร์ซเลนที่ดีก็จะลดการหดตัวหลังเผาได้ การหดตัวของพอร์ซเลนขณะเผาเกิดการสูญเสียความชื้นและเพิ่มความหนาแน่นของผงพอร์ซเลนขณะที่หลอมเหลวและเชื่อมเข้าด้วยกัน การเพิ่มความหนาแน่นก่อนเผาโดยการอัดแน่นผงพอร์ซเลนจะทำให้ลดการหดตัวหลังเผาได้

การเชื่อมกันของโลหะและพอร์ซเลนจะสูงสุดเมื่อทำการอัดแน่นชั้นสารทึบแสง (opaque) ได้ดี เพราะโครงโลหะจะมีความชื้นอย่างสมบูรณ์มากกว่าขณะที่พอกพอร์ซเลนลงไปและอัดแน่นโดยการต่าง ๆ ดังนี้

### 2.1 วิธีขับ (capillary action , gravitation method)

เป็นเทคนิคที่ใช้การดูดซับส่วนที่เปียกด้วยกระดาษซับ (เช่น การดาษเช็ดหน้า,ผ้าก๊อชหรือกระดาษซับ) โดยใช้แรงดึงผิว (capillary action) เพื่อดึงน้ำและกดให้ผงพอร์ซเลนอัดแน่นเข้าด้วยกัน (Phillips , 1991 ) วิธีนี้มักจะใช้ร่วมกับวิธีอื่น ๆ อีก 1 วิธีหรือมากกว่า การใช้เทคนิคนี้อย่างเดียวจะไม่สามารถเอาส่วนเหลวที่ต้องการออกหมดได้ ควรใช้การเขย่าหรือปิดไปมาตามด้วยการซับเอาส่วนเหลวออกมาจนหมด ควรทำเบา ๆ ปรานีต เพราะถ้าทำรุนแรงแล้วพอร์ซเลนที่พอกไว้จะหลุดหรือกระเทาะออกได้



## 2.2 วิธีการเขย่า (vibration)

วิธีที่ง่ายและธรรมดาที่สุดคือการใช้เครื่องมือที่เป็นพื้นปลาถูกลงไปบนส่วนคอกของปากคืบที่จับชิ้นงานอยู่ (Muia,1982) หรือเคาะเบา ๆ ที่คอกของปากคืบ หรือถ้าชิ้นงานอยู่บนแบบหลักก็อาจใช้เคาะหรือเขย่าแบบหลักก็ได้ เพื่อให้ น้ำที่มากเกินไปหลุดออกมาที่ผิว แล้วใช้กระดาษซับออก การเขย่าอาจใช้แปรงสำหรับเขย่า พาย (spatula) หรือเครื่องเขย่าอุลตราโซนิก (ultrasonic condenser) สำหรับคนที่เริ่มหัดทำนั้นควรใช้เครื่องเขย่าอุลตราโซนิกเฉพาะขั้นสุดท้ายของการอัดแน่นเท่านั้น ขั้นแรกให้ใช้การเคาะก่อนเพราะชั้นพอร์ซเลนอาจกระเทาะหลุดหรือแต้ละชั้นอาจไหลมารวมกันได้ถ้าทำแรง

แรงตึงผิวจะเป็นแรงที่ทำให้ส่วนเหลวหดเข้ามารวมกันที่บริเวณที่เล็กที่สุด เปลี่ยนจากหยดน้ำเป็นก้อนกลม ในส่วนพอร์ซเลนที่เปียก แรงนี้จะช่วยอัดผงให้แน่นมากขึ้นระหว่างการเขย่าและซับน้ำ ถ้าใช้การซับอย่างเดียว ความชื้นทั้งหมดที่เหลืออยู่จะไหลออกไปหมด ดังนั้นในบางครั้งจึงต้องใช้การสั่นเพื่อนำให้ความชื้นมาอยู่ที่ผิวก่อนซับออกด้วยกระดาษซับ

## 2.3 วิธีตบด้วยพาย (spatulation)

ใช้พายหรือเครื่องมือแต่งพอร์ซเลนในการก่อรูปร่างแล้วตบเบา ๆ เพื่อให้ น้ำขึ้นมาบนผิว (Philips,1991: Muia,1982) แต่วิธีนี้ทำให้พอร์ซเลนกระเทาะหลุดได้ง่ายถ้าใช้แรงมากโดยเฉพาะการก่อตอนเริ่มต้น หรืออาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวในภายหลังได้ (Muia,1982)

## 2.4 วิธีสัด (whipping)

ใช้พู่กันเบอร์ 10 (sable brush) บัดไปมาบนผิวพอร์ซเลนเร็ว ๆ จะทำให้ส่วนเหลวขึ้นมาบนผวแล้วใช้กระดาษซับ

## 2.5 วิธีการใช้ผงพอร์ซเลนแห้งพอกเพิ่ม (dry powder addition)

เป็นวิธีที่ไม่ค่อยนิยมใช้ บางครั้งเรียก วิธีใช้พู่กัน (brush application technique) โดยใช้ผงพอร์ซเลนแห้งป้ายบนบริเวณที่พอร์ซเลนเปียก (McLean,1979) และใช้ส่วนเหลวนั้นทำให้ผงเปียก การประมาณจำนวนและตำแหน่งที่จะป้ายเพิ่มจะทำได้ยากสำหรับผู้เริ่มทำใหม่จะต้องใช้เวลามากกว่าวิธีอื่น

## 3. การเผาพอร์ซเลน

การเกิดฟองอากาศมักจะพบบ่อยในพอร์ซเลนที่เผาในเตาเผาที่มีอากาศ (air firing porcelain) มากกว่าเผาในเตาเผาสุญญากาศ (vacuum air firing porcelain) (Craig,1993 ) โดยพบว่า

จะมีฟองอากาศประมาณ 6.3 % (Barghi และคณะ,1975) ทำให้ผิวขรุขระและคุณสมบัติทางสีเปลี่ยนไป และยังพบว่าฟองอากาศเป็นผลจากมีก๊าซเข้าไปฝังอยู่ในเฟลด์สปาร์ขณะที่มีการหลอมเหลวและเชื่อมติดกัน ช่องว่างจะมีลักษณะกลมเนื่องจากมีความตึงผิวและจะขยายใหญ่ขึ้นถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น วิธีที่จะแก้ไขคือเผาในสุญญากาศขณะที่มีการหดตัวเกิดขึ้นแทนการเผาในอากาศ ในขั้นแรกเมื่อเผาสารอินทรีย์ออกไปที่ชั้นบรรยากาศอุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียสก่อนที่การเชื่อมกันจะเริ่ม ขณะที่ยังเป็นผงหรือบิสกิต (biscuit) ควรดูอากาศออกและคงสภาพไว้จนกว่าจะมีการหลอมและมีการหดตัวที่สมบูรณ์ แล้วจึงค่อยปล่อยอากาศเข้า และขึ้นเผาเพื่อเคลือบมันจะเผาที่ความดันบรรยากาศเพื่อป้องกันการเค็คหรือฟองระหว่างอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสสุดท้ายที่เพิ่มขึ้น

กลไกการทำการเดนซิฟิเคชัน (densification) ภายใตสุญญากาศยังทำให้มีแรงอัดที่สูงมากได้ ซึ่งถ้าไม่อยู่ในสุญญากาศจริง ๆ แล้วจะยังคงมีฟองอากาศเล็ก ๆ เหลืออยู่ได้ วิธีอื่นที่ใช้ได้คือวิธีใช้หลักของการซึมผ่าน (diffuse) ทำให้พอร์ซเลนที่เชื่อมกันมีความหนาแน่น ก๊าซที่ใช้ในการซึมผ่านได้แก่ ก๊าซฮีเลียม (helium) เพื่อทำให้ความดันในเตาเผาระหว่างขั้นตอนเดนซิฟิเคชันลดลง ก๊าซฮีเลียมจะไปแทนที่อากาศที่ฝังอยู่ในพอร์ซเลนโดยเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลของก๊าซฮีเลียมจะเล็กกว่าโครงร่างตาข่ายของพอร์ซเลน ก๊าซฮีเลียมจะซึมผ่านออกมาภายใต้ความดันของการหดตัวของพอร์ซเลน

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้คือใช้ความดันในการเผา ในขั้นเผาเพื่อเคลือบมันจะทำการเผาในเตาที่มีอากาศแต่อยู่ในฝาที่มีความดันที่คงไว้ 1.55 เมกกะปาสคาล จากอุณหภูมิต่ำไปถึงอุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลงและมีความหนาแน่นเท่ากับเผาในเตาสุญญากาศและเผาโดยการใช้ก๊าซซึมผ่าน วิธีนี้จะไม่เผาจำที่อุณหภูมิเคลือบผิว (self-glazing) ที่ความดันบรรยากาศปกติ เพราะฟองอากาศที่ถูกอัดไว้ให้มีขนาดเล็กจะขยายเป็นรูพรุนในพอร์ซเลนที่เผาในอากาศได้ วิธีนี้จะช่วยให้ประหยัดและมีประโยชน์ในการทำฟันพอร์ซเลนมาก

นอกจากนี้การเผาภายใต้สุญญากาศจะทำให้พอร์ซเลนมีความโปร่งแสงเพิ่มขึ้นและมีพลังงานในการอัด (impact energy) มากขึ้นด้วย โดยมีพลังงานในการอัดมากกว่า 300 กรัมเซนติเมตรเมื่อเทียบกับเผาในเตาที่มีอากาศซึ่งมีค่าเพียง 200 กรัมเซนติเมตร ความแข็งแรงในการอัด (impact strength) จะเพิ่มขึ้นได้เมื่อสร้างความเค้นขนาดปานกลางในชั้นนอกสุดของเคลือบผิว ขณะที่พอร์ซเลนเย็นตัวลง สัมประสิทธิ์การขยายตัวของพอร์ซเลนชั้นนอกจะต่ำลงเล็กน้อย ทำให้มีความเค้นแรงอัดจำนวนเล็กน้อยเหลืออยู่บนพอร์ซเลนด้วย พอร์ซเลนจะมีความแข็งแรงภายใต้

แรงอัดมากกว่าแรงดึง คุณสมบัตินี้จึงถูกใช้เป็นตัวเสริมในการเพิ่มความต้านทานต่อการแตกละเอียด (shattering)

#### 4. วิธีการขัดแต่ง

การขัดแต่งหมายถึงการกำจัดวัสดุส่วนเกินและทำให้พื้นผิวเรียบ พื้นผิวที่ขรุขระของชิ้นงานจะทำให้รักษาความสะอาดยาก เนื่องจากมีเศษอาหารและคราบจุลินทรีย์ไปติดง่าย ในกรณีที่ชิ้นงานอยู่ใกล้เหงือก พื้นผิวที่ขรุขระอาจทำให้เกิดความระคายเคือง เหงือกอักเสบ เกิดการเสถียรของโลหะได้ การขัดแต่งจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในความสำเร็จของชิ้นงานในคลินิก (Craig, O'Brien และ Powers, 1992) แต่การขัดแต่งที่ดีจะไม่เกิดขึ้นกับการกรอฟันที่ไม่เพียงพอ การใส่ที่ไม่ดี และขั้นตอนอื่น ๆ ที่จำเป็นและเกี่ยวข้องกับความสะดวกและการใช้งานของชิ้นงาน

วัตถุประสงค์ของการขัดแต่งมีดังนี้ (Goldstein, 1989)

1. เพื่อปรับปรุงแก้ไขและแต่งขอบและรูปร่างของชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานเข้ากันกับฟันและเนื้อเยื่อ
2. เพื่อให้ได้ความมันของผิวที่มากที่สุด เพื่อให้เกิดความสวยงาม ลดการเกาะติดของสีและคราบจุลินทรีย์ รวมทั้งมีการเสถียรและแตกหักได้น้อย

ชิ้นงานที่ขัดแต่งเรียบร้อยแล้วควรมีลักษณะดังนี้

1. มีขอบที่ดี ไม่มีขอบเกิน ฟองอากาศ หรือส่วนของวัสดุที่ยื่นออกไปรอบกวนเนื้อเยื่อ
2. ผิวมีความเรียบมากเพียงพอที่จะไม่ให้คราบจุลินทรีย์หรืออาหารไปติด
3. มีลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมที่เหมือนหรือคล้ายกับฟันข้างเคียงหรือฟันคู่สบ
4. สีเข้ากันกับฟันข้างเคียง ฟันคู่สบหรือสีฟันที่ได้เลือกไว้ก่อน
5. ผิวที่ขัดแต่งเสร็จเรียบร้อยแล้วไม่ควรมีรูปร่างที่ชัดเจนเกินไป ไม่มีรอยหัวกรอเหลืออยู่

**การขัดสี (abrasion) (Phillips, 1991)**

การขัดสีเกิดขึ้นเมื่อมีผิวที่แข็งและขรุขระถูผ่านผิวที่อ่อนกว่าและตัดหรือขูดให้เป็นร่องขึ้น จะมีทั้งเกิดจากผิวขัด 2 ส่วนเช่นเมื่อใช้หัวกรอการเพชรกรอผิวฟัน และ 3 ส่วนคือมีผงที่มีความแข็งอยู่ระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด (rubbing surface) เช่นการใช้ผงฟิวมิสและหัวขัดยางขัดผิวเคลือบฟันระหว่างการขัดทำความสะอาดในช่องปากหรือการใช้ยาสีฟันขณะแปรงฟันเป็นต้น

แม้ว่าการขัดสีจะรวมถึงท่าทางการตัด (cutting action) ภาพถ่ายของผิวที่ถูกขัดสีจะแตกต่างจากผิวที่ถูกกรัดตัด เครื่องมือที่ใช้ตัดเช่นหัวกรอ ส่วนคมหรือส่วนที่ใช้ตัดจะเรียงตัวเป็นระเบียบ ผิวที่ถูกตัดจะมีลักษณะเป็นระเบียบตามส่วนคมที่ตัด แต่เครื่องมือที่ใช้ขัดจะมีส่วนที่ใช้ขัดและสัมผัสกับผิวที่ต้องการขัดหลายจุดซึ่งไม่ได้เรียงเป็นระเบียบ เช่น หัวขัดรูวงล้อ (grinding wheel) หรือหัวกรอกากเพชร ซึ่งประกอบด้วยจุดคมที่ใช้ขัดเป็นพัน ๆ จุดระหว่างที่ใช้งาน แต่ละจุดทำหน้าที่เป็นเหมือนมีดคม และกำจัดส่วนที่เป็นครีบหรือโกน (shaving) วัสดุ แต่ละจุดที่ทำหน้าที่ตัดจะถูกวางเรียงอย่างสุ่ม รอยที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมาก

หัวขัดที่ใช้ในทางทันตกรรมจะเรียกเป็นระบบตัวเลข ผงขัดจะถูกติดบนกระดาษหรือแผ่นงานพลาสติก (plastic disk) ที่สามารถใช้กับที่จับหัวกรอได้ ในกรณีที่เป็นหัวกรอกากเพชร กากเพชรจะติดอยู่บนล้อเหล็ก (steel wheels) แผ่นงาน (disks) และรูปทรงกระบอก (cylinder) สำหรับหัวขัดรูวงล้อและหัวกรอหิน (dental stone) ผงขัดจะถูกผสมกับสารเชื่อมติด (bonding agent) หรือวัสดุก่อรูป (matrix material) ซึ่งรวมผงเข้าด้วยกันก่อนที่จะไปทำให้แข็งขึ้น วัสดุก่อรูปจะถูกนำมาผสมกับผงและขึ้นรูปเป็นรูปร่างและขนาดต่าง ๆ ดังรูป 2-2



รูปที่ 2-2 แสดงหัวกรอชนิดต่าง ๆ ที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน

ผงขัดอาจใช้ผสมน้ำ กลีเซอริน หรือสารอื่นที่ทำให้เป็นครีมหรือผงเปียกน้ำ (slurry) ผงเปียกน้ำจะใช้ขัดผิวได้โดยใช้ผ้าหรือสีกหลาด ด้วยยาง หรือแปรง ซึ่งจะช่วยให้ขัดได้สะดวกขึ้น

หัวขัดที่ใช้ในทางทันตกรรมมีหลายชนิดได้แก่ (Craig ,O'Brien และ Powers,1992 ; Phillips, 1991)

1. อีเมอริ (emery) ประกอบด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียมเรียก คอร์รันดัม (corundum) ซึ่งอาจมีส่วนอื่นผสมด้วยเช่น เหล็กออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนขัดสี
2. อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide,  $Al_2O_3$ ) อลูมิเนียมออกไซด์บริสุทธิ์ทำมาจากแร่ บอกไซด์ (bauxite) ซึ่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ไม่บริสุทธิ์ ทำออกมาหลายขนาด (grain size) ผงขัดนี้ส่วนใหญ่จะติดลงไปบนกระดาษหรือแผ่นพลาสติกที่เป็นฉีกในขนาดหยาบ กลางและละเอียด ฉีกที่มีสีน้ำตาลแดง อาจใช้แทนอีเมอริได้ อลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดละเอียดมากได้มาจากขั้นตอนที่นำส่วนที่ลอยน้ำได้มาโดยเรียกว่า ลิวิเกอ อลูมินา (levigated alumina) ซึ่งใช้ในการขัดชิ้นงานโลหะ (metallographic)
3. การ์เน็ต (garnet) เป็นตัวขัดที่ขูดออกมาใช้โดยตรง มีส่วนประกอบทางเคมี คือ  $Al_2O_3 \cdot 3FeO \cdot 3SiO_2$  คำนี้รวมถึงแร่ธาตุต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างผลึกที่เหมือนกันด้วย แร่ธาตุในที่นี้หมายถึงซิลิเกตของส่วนประกอบของอลูมิเนียม โกลบอลท์ แมกนีเซียม เหล็กและแมงกานีส การ์เน็ตมักจะเคลือบบนกระดาษ พลาสติกหรือผ้าด้วยกาวหรือสารเชื่อมยึดอื่น เป็นหัวขัดที่ใช้กันทั่วไปในการขัดฟันปลอม มีขนาดหยาบมาก หยาบ ปาน กลาง ละเอียด และละเอียดมาก มีสีแดง
4. พิวมิส (pumice) เป็นทรายภูเขาไฟที่ระเบิดออกมาเหมาะสำหรับใช้เป็นผงขัดหรือใช้ขัดมันขึ้นกับขนาดของผงที่เลือกใช้ ในทางทันตกรรมใช้ขัดเรียบฟันปลอมไปจนถึงขัดฟันในปาก
5. คีเซลเกอร์ (kieselguhr) ประกอบด้วยทรายจากต้นไม้ได้นำ (diatoms) เป็นผงขัดชนิดละเอียดใช้ขัดมันได้ ขนาดที่หยาบของคีเซลเกอร์เรียก ไดอะโตมาเซียส เอิร์ธ (diatomaceous earth) ใช้เป็นตัวที่เติมเข้าไปในวัสดุทางทันตกรรมบางชนิด (filler) เช่นวัสดุพิมพ์ปากชนิดไฮโดรคอลลอยด์
6. ทริโพลี (tripoli) เป็นผงขัดชนิดละเอียดใช้ขัดมันได้ มักสับสนกับคีเซลเกอร์ ซึ่งมักจะนำมาใช้แทนกัน ทริโพลีเกิดจากหินปูน พบครั้งแรกในอาฟริกาเหนือ ใกล้เมืองทริโพลี
7. รูธ (rouge) เป็นผงละเอียดสีแดงประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) มักนำมาทำเป็นรูปก้อน บางครั้งอาจฝังลงในกระดาษหรือผ้าเรียกผ้าโครซัส (crosus cloth) ใช้ขัดทองและโลหะผสมมีค่าอื่น ๆ แต่จะสกปรกเลอะเทอะได้ง่าย
8. ทินออกไซด์ (tin oxide,  $SiO_2$ ) เป็นผงสีขาวล้วนใช้ขัดชิ้นสุดท้ายสำหรับฟันและชิ้นงานที่เป็นโลหะในปาก โดยผสมกับน้ำ อัลกอฮอล์ หรือกลีเซอริน ใช้เป็นลักษณะคริม

9. ชอล์ก (chalk) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต เตรียมโดยวิธีตกตะกอนซึ่งมีหลายระดับ และหลายลักษณะ ใช้ในเทคนิคการขัดที่แตกต่างกัน
10. โครมิกออกไซด์ (chromic oxide,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) เป็นผงขัดที่มีความแข็งใช้ในการขัดโลหะชนิดต่าง ๆ และมักใช้ในการขัดสเตนเลสสตีล (stainless steel)
11. คัตเติล (cuttle) เป็นตัวขัดที่ทำมาจากกระดูกปลา แม้ว่าจะใช้รูปแบบนี้เป็นหัวขัดได้ในช่วงเวลาไม่นาน แต่คัตเติลก็เป็นชื่อที่หมายถึงเกรดละเอียดของควอร์ต ส่วนผงขัดจะถูกติดไปบนดิสก์กระดาษแบบหยาบ กลาง ละเอียด ขนาดกลางของคัตเติลจะมีลักษณะการขัดเหมือนทรายชนิดละเอียด คัตเติลดิสก์จะมีสีเทาแกมแดงหรือสีทราย
12. ทราย (sand) เป็นอีกรูปหนึ่งของควอร์ต ใช้เป็นผงในการทำการเป่าทราย หรืออยู่ในรูปพลาสติกหรือกระดาษ มีขนาดหยาบ กลางและละเอียดสีเทาแกมแดงหรือสีทราย ไม่ควรใช้แทนคัตเติลดิสก์แม้ว่าจะประกอบด้วยควอร์ตเหมือนกันเพราะขนาดของผงหยาบ ละเอียดจะไม่เหมือนกัน
13. คาร์ไบด์ (carbide) มีหลายอย่างเช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide,  $\text{SiC}$ ) และ โบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide,  $\text{B}_4\text{C}$ ) ใช้เป็นหัวขัดที่มีประสิทธิภาพสูง ทำโดยให้ความร้อนกับซิลิกอนและโบรอนที่อุณหภูมิสูงมากจนเป็นส่วนเดียวกันกับคาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์จะถูกเผาเชื่อมหรืออัดเข้าด้วยกันกับสารเชื่อมเป็นรูปวงล้อหรือดิสก์ มีขนาดละเอียด ละเอียดมากและละเอียดมากที่สุด มีสีดำหกรอส่วนใหญ่ที่ใช้ตัดฟันทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์
14. หัวกรอกากเพชร (diamond) เป็นหัวขัดที่แข็งที่สุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุดในกรอเคลือบฟัน ประกอบด้วยกากเพชรซึ่งฝังอยู่ในตัวเชื่อมหรือยึดติดบนโลหะส่วนหัวของหัวกรอ เป็นหัวกรอหินกากเพชร (diamond stone) และดิสก์ซึ่งนิยมมากในทางทันตกรรม
15. เซอร์โคเนียมซิลิเกต (zirconium silicate,  $\text{ZrSiO}_4$ ) เป็นหัวขัดที่แข็ง เกิดในธรรมชาติในรูปของเซอร์คอน (zircon) มีหลายขนาดและใช้เป็นตัวขัดมัน มักใช้ผสมในยาสีฟันและแถบขัด (abrasive-impregnated polishing strips) และดิสก์
- ลักษณะการขัดของหัวขัดขณะที่เคลื่อนบนผิวจะเป็นลักษณะการตัด (cutting action) ผงขัดแต่ละผงเล็ก ๆ จะมีขอบที่คมซึ่งจะตัดผิวในลักษณะเหมือนกับจุดคมของสิ่ว (chisel) การโกน (shaving) จะเกิดขึ้นทันทีที่ขัดถึงผงละเอียด จนกว่าหัวขัดจะถูกอุดตันซึ่งจำเป็นจะต้องทำความสะอาดบ่อย ๆ

ลักษณะของหัวขัดที่ดีควรมีลักษณะดังนี้ (Phillips, 1991)

1. ผงขัดควรมีรูปร่างไม่แน่นอนและมีขอบคม ทราบที่มีลักษณะผงกลม เรียบเหมือนที่พบในหาดทรายจะมีคุณภาพในการตัดต่ำ ดังนั้นกระดาษทรายที่ฝังด้วยผงที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ลูกบาศก์ (cubical particle) และผิวราบจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่ฝังด้วยผงที่มีลักษณะขรุขระไม่เรียบ ไม่เป็นระเบียบ (irregular jagged particle)

2. หัวขัดควรมีความแข็งมากกว่างานที่ขัด ถ้าหัวขัดไม่สามารถทำให้ผิวเป็นรอยขัดได้ ก็ไม่สามารถใช้ตัดได้ ในบางครั้งหัวขัดอาจทื่อหรือสึกไป ค่าความแข็งผิวของหัวขัด 5 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ค่าความแข็งผิวของอนุป (Knoop hardness number of abrasive) ของหัวกรอชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุ (Abrasive)	KHN
ทราย	800
อีเมอรี่	2000
ซิลิกอนคาร์ไบด์	2500
โบรอนคาร์ไบด์	2800
หัวกรอกากเพชร	มากกว่า 7000

3. หัวขัดต้องมีค่าความแข็งแรงอัดสูง (impact strength) หรือมีความแข็งแรงของส่วนวัตถุสูง (body strength) เช่นเมื่อใช้หัวกรอรูปร่างล้อกรอโลหะ ส่วนผงขัดจะทำงานโดยเคลื่อนเป็นวงตามวงล้อหมุน ถ้าผงขัดถูกทำให้แตกละเอียดทันทีที่เริ่มทำงาน จะทำให้ไม่มีประสิทธิภาพ หรือถ้าไม่แตกแต่ขอบที่ประสิทธิภาพการตัดก็จะลดลง ผงขัดควรจะแตกดีกว่าที่เพราะการแตกจะยังมีขอบคมอยู่ การแตกของหัวขัดจะช่วยให้เศษตกค้างต่าง ๆ จากการกรอหลุดออกไปด้วย แม้ว่าหัวกรอกากเพชรจะใช้ตัดหินหรือชิ้นงานเกือบทุกชนิด ผงกากเพชรไม่ควรจะแตก จนกว่าจะหลุดออกจากปลายไป ยิ่งกว่านั้นถ้ากรอวัสดุที่นิ่มและเหนียวจะทำให้อัดติดในหัวกรอได้ หัวกรอจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้กรอเนื้อพื้นที่มีความแข็งและเปราะ

อันดับของความแข็งแรงของส่วนวัตถุมีลำดับเดียวกับความแข็งผิวดังตารางที่ 2-6

4. คุณภาพของผงขัดขึ้นกับความต้านทานต่อการสึก เช่นการสึกของซอร์คที่เขียนบนกระดาษหรือใส่ดินสอที่เขียนบนกระดาษ การสึกหรือการทื่อก็ไม่ได้เป็นผลจากการสึกเสมอไป

ผงขัดอาจถูกยึดหรือฝังด้วยการใช้สารเคมี เช่น เมื่อใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์กรอเหล็กจะทื่อเร็วกว่า อะลูมินัมออกไซด์เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์ละลายในเหล็ก

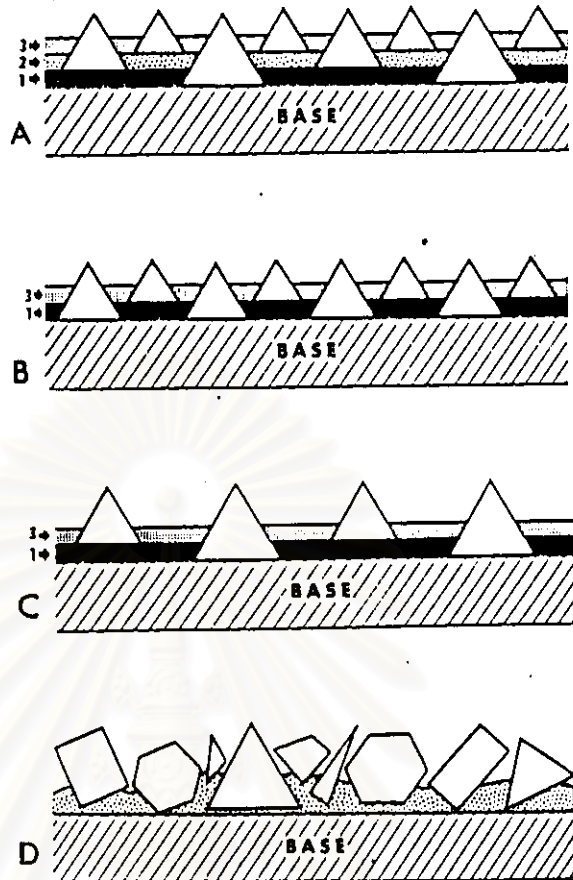
### **สารเชื่อมยึด (binder)**

ในหัวกรอรูปวงล้อและดิสก์ ผงขัดจะถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยสารเชื่อมยึด เช่น สารเชื่อมยึดเซรามิก (ceramic bonding) จะใช้ในการยึดซิลิกอนคาร์ไบด์หรือคอร์ันดัม การใช้ไฟฟ้าในการยึด (electroplating) ผงกากเพชรให้ติดกับนิเกิลในหัวกรอกากเพชร สำหรับดิสก์ชนิดอ่อน (soft grade disk) จะใช้ยางหรือเซตแลคเป็นสารเชื่อมยึดจะสึกได้ง่าย แต่ใช้ในการขัดส่วนที่ต้องการความละเอียดอ่อน ปราณีดี

ชนิดของสารเชื่อมยึดจะเกี่ยวข้องกับระยะเวลาที่ใช้หัวขัด หัวขัดที่มีประสิทธิภาพสารเชื่อมยึดจะถูกฝังทะลุด้วยผงขัดที่อยู่ในระดับแน่นอน จนกว่าผงจะถูกดึงจากสารเชื่อมยึดขณะใช้งานจนสารเชื่อมยึดค่อย ๆ สึกไป ยิ่งกว่านั้นผงขัดจะถูกกระจายออกด้วย ซึ่งผิวของหัวขัดจะสึกถ้าใช้ดิสก์หรือวงล้อตัดตามรอบนอกของหัว

หัวกรอกากเพชรจะใช้กากเพชรทั้งแบบธรรมชาติและแบบสังเคราะห์ในการทำหัวกรอทางทันตกรรม โดยฝังเข้าไปในสารแกนหลัก (matrix) อย่างไรก็ตามกากเพชรจะมีราคาแพงจึงใช้เพียงแค่ฉาบรอบ ๆ กากเพชรจะทื่อช้ากว่าหัวขัดอื่น ๆ ความคิดในการทำการฝังกากเพชรแสดงในรูปที่ 2-3 รูป A แสดงภาพจำลองการวางเรียงผงกากเพชรแบบ 3 ชั้นโดยใช้กากเพชร 3 ขนาด และรูป B แสดงภาพการวางเรียงผงกากเพชรแบบ 2 ชั้น โดยใช้กากเพชร 2 ขนาด ซึ่งทั้งสองชนิดนี้ใช้ในการกรอตัดให้เรียบโดยต้องการให้มีการสั้นน้อย รูป C แสดงการวางเรียงกากเพชรชนิดหยาบ 2 ขนาด ซึ่งจุดที่ใช้กรอจะสูงกว่าสารเชื่อมยึด และมีพื้นที่เหลือกว้างกว่า จะทำให้ตัดได้เร็วกว่าแต่เป็นรอยขูดลึก ใช้ในการกรอหยาบ ช่องว่างที่มีระหว่างผงกากเพชรจะเป็นที่สำหรับเศษจากการตัดไปอยู่ จะทำให้มีการอัดแน่นหรือยึดติดเป็นก้อนน้อยลง รูป D ใช้กากเพชรที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันโดยมีสารเชื่อมยึดเพียงชั้นเดียว จะทำให้หัวขัดมีผิวที่ขรุขระ เมื่อใช้หัวกรอแล้วมีกากเพชรหลุดไปก็จะยิ่งขรุขระมากขึ้น หัวขัดจะสั้นมากหรือมีเสียงดัง และมีความร้อนเกิดขึ้นและประสิทธิภาพการกรอตัดน้อย ยิ่งกว่านั้นการควบคุมในการตัดจะทำได้ยากมากขึ้น





รูปที่ 2-3 แสดงภาพจำลองการวางเรียงผกากเพชรแบบต่าง ๆ

ประสิทธิภาพในการตัดขึ้นกับว่าใช้กากเพชรจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ ขนาดของกากเพชร การกระจายของกากเพชรและการใช้ไฟฟ้าในการยึดติดกากเพชรที่หัวกรอ ถ้าทำการยึดติดด้วยไฟฟ้ามากเกินไปจะลดประสิทธิภาพการตัดเนื่องจากส่วนที่ใช้ตัดจะไหลออกมาน้อย ถ้าทำน้อยเกินไปจะทำให้กากเพชรไม่ยึดติด การใช้น้ำร่วมด้วยในการกรอที่เพียงพอนอกจากจะลดความร้อนแล้วยังลดการอัดแน่นของเศษที่หัวกรอขณะกรอพื้นด้วย

**ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วในการกรอ** ขึ้นกับ 3 ปัจจัยดังนี้คือ (Craig ,O'Brien และ Powers,1992 ; Phillips, 1991)

1. **ขนาดของผงขัด** ถ้าผงขัดมีขนาดใหญ่จะเกิดรอยขีดที่ลึกกว่า ผิวจะสึกไปเร็วกว่าในการเลือกใช้ขนาดของหัวขัดขึ้นกับจุดขรุขระที่ต้องการกรอหรือขัดบนชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานมีผิวที่ขรุขระขนาดใหญ่ ควรเลือกใช้หัวขัดชนิดหยาบ แต่การใช้หัวขัดหยาบก็จะเหลือรอยขีดข่วนเล็ก ๆ อยู่ ซึ่งต้องใช้หัวขัดละเอียดขัดต่อ เพราะถ้าใช้หัวละเอียดขัดผิวที่หยาบมากจะทำให้เสียเวลามาก

2. **แรงในการขัด** (pressure) ถ้าใช้แรงในการขัดมากรอยขีดข่วนที่เกิดจะลึกกว่าและกรอได้เร็วกว่า แต่ถ้าขณะที่ผงขัดผ่านบนชิ้นงานแล้วมีแรงดันกลับของงานจะทำให้ผงขัดแตกหักหรือหลุดออกได้ การขัดหัวขัดรูปวงล้อโดยใช้แรงมากจะเกิดรอยลึกมากและมีโอกาสที่ทำให้ผงหลุดหรือแตกหัก ประสิทธิภาพของหัวขัดจะลดลงมากถ้าหัวขัดมีการสึกไป ควรปรับให้อยู่ในแรงที่เหมาะสม

3. **ความเร็วในการกรอ** ซึ่งหมายถึงผงขัดที่ผ่านไปบนผิวชิ้นงาน ถ้าใช้ความเร็วในการหมุนสูงจำนวนครั้งที่ผงขัดสัมผัสกับพื้นผิวจะมากกว่า การเพิ่มความเร็วในการกรอจะเป็นการเพิ่มอัตราในการกรอตัดด้วยผงขัด โดยไม่มีการสึกของหัวขัด จะมีผงขัดจำนวนมากผ่านชิ้นงานด้วยอัตราเร็วสูง แรงที่เกิดขึ้นระหว่างหัวขัดและชิ้นงานสามารถลดลงได้โดยไม่ต้องลดอัตราการสึก

ถ้าใช้แรงขัดมากเกินไป การสึกหรือแตกหักของผงขัดจะเกิดขึ้นเร็วกว่าใช้ความเร็วต่ำ ยิ่งกว่านั้นหัวของซิลิกอนคาร์ไบด์หรือหัวกรอจากเพชรอาจหักจากด้ามหัวกรอได้ ซึ่งก็พบได้กับการใช้หัวกรอเหล็กและหัวกรอคาร์ไบด์

#### **การขัดมัน** (polishing) (Phillips, 1991)

เมื่อใช้หัวขัดที่ละเอียดขัดผิวชิ้นงานแล้ว รอยขูดขีดที่มีจะหมดไปและผิวที่เรียบนั้นต้องการให้มีความมันเกิดขึ้น เรียกว่า การขัดมัน

การแยกความแตกต่างระหว่างผงขัด (abrasive agent) และผงขัดมัน (polishing agent) ทำได้ยาก ในการทำงานจะใช้คำนี้แทนกันได้ โดยถ้ามีขนาดของผงหยาบจะเรียก ผงขัด ถ้ามีขนาดผงละเอียดจะเรียก ผงขัดมัน

ผงขัดมันจะมีความแตกต่างกันในการขัดเอาส่วนของผิวชิ้นงานออกไป บางชนิดจะขัดได้เรียบมันดี แต่จะขัดเอาส่วนของผิวของชิ้นงานออกไปมากด้วย แม้ว่าบางชนิดจะมีผงขนาดเล็ก แต่ก็ตัดเอาผิวออกไปได้เร็วเนื่องจากผงมีความคมและแข็ง และก็ขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่เราจะขัดด้วย

ดังนั้นสารขัดชนิดหนึ่งจะเหมาะกับชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุที่เหมาะสมกันเท่านั้น เช่น หัวขัดอลูมิเนียมจะใช้ขัดโลหะได้เรียบมันมากโดยไม่สูญเสียผิวของโลหะ เมื่อนำไปใช้ขัดเคลือบพื้นและเนื้อพื้น แม้จะขัดได้เรียบมันดีแต่ก็ทำให้พื้นสึกเร็วมาก จึงเหมาะที่จะใช้ขัดโลหะเท่านั้น ไม่ใช้ขัดพื้น

หัวใจของความสำเร็จในการขัดคือจะต้องขัดตามลำดับความหยาบและละเอียดของหัวกรอที่ได้แนะนำไว้เสมอ เมื่อขัดเสร็จด้วยหัวขัดหนึ่งแล้ว ควรล้างและเอาผงขัดที่เหลืออยู่เก่าออกให้หมดก่อนจึงจะเริ่มขัดด้วยหัวใหม่ เพราะผงที่ตกค้างอยู่อาจทำให้เป็นรอยได้ และไม่ควรขัดแห้งเพราะประสิทธิภาพในการขัดจะลดลงและอาจเกิดความร้อนที่ผิวได้ (Craig ,O'Brien และ Powers,1992)

#### การขัดแต่งผิวพอร์ซเลน (Korson,1990)

ผิวพอร์ซเลนที่มีการเคลือบผิวมากเกินไปจะทำให้เกิด การสะท้อนแสงกลับมาก (high specular reflection) แสงที่สะท้อนกลับเข้าสู่ตาจะทำให้เกิดปัญหาหลายอย่าง ฟันธรรมชาติจะไม่มีลักษณะเหมือนแก้วหรือผิวพอร์ซเลนที่เคลือบมันมาก ๆ ซึ่งจะดูไม่เป็นธรรมชาติเมื่ออยู่ในปาก ฟันผิวควรมีลักษณะเหมือนฟันธรรมชาติเพราะการสะท้อนของแสงกลับมากจะทำให้ขาดความลึกของโครมา (chroma) และความโปร่งแสง ตรงกันข้ามถ้ามีแสงผ่านความลึกลงไปถึงชั้นเนื้อฟันมากเกินไป คลื่นแสงจะผ่านสีและมีการสะท้อนสีด้านหลังขึ้นมาสู่ตาได้ (DeVreugd . และ Eissmann,1986)

ในที่ที่ไม่มีแสงจะไม่มีสีเกิดขึ้น ถ้ามีการสะท้อนแสงมาก มีแสงผ่านชั้นเคลือบฟันและเนื้อฟันน้อยจะทำให้ลดความลึกของโครมา ผิวที่ขัดแล้วลดการสะท้อนของผิวและผิวฟันธรรมชาติสามารถทำให้เกิดขึ้นได้

ผิวชั้นเคลือบฟันที่เรียบและขัดแล้วจะเหมือนฟันธรรมชาติ การทำการเคลือบผิวโดยทาน้ำยาเคลือบ (overglaze)จะมีผลต่อสีและการสะท้อนกลับของแสงสูง การเคลือบผิวที่ถูกต้องควรจะหลอมเพียงผิวที่ลึกลงไปประมาณ 25 ไมครอน การเคลือบผิวโดยทาน้ำยาเคลือบจะทำให้เกิดแก้วอมอฟัส (amorphous glass) ซึ่งจะไม่มีปรากฏการณ์ปริซึม (prismatic effect) ซึ่งเป็นผลของการเกิดการสะท้อนของแสงจากขอบของเกรน (grain boundaries)

ควรทำการเคลือบผิวน้อย ๆ เพื่อให้ผิวเป็นลักษณะคล้ายผ้าซาติน (satin) การขัดพอร์ซเลนเพื่อให้มีความมันจะยังคงมีคุณสมบัติของปริซึมของเกรนตามที่เราต้องการ เทคนิคการขัดนี้อาจทำให้ขัดมากเกินไปจนเสียลักษณะรายละเอียดของพื้นผิวได้ (perikymata) และการขัดด้านข้างและด้านบดเคี้ยวจะทำให้ยากและเป็นปัญหาในการรักษาความสะอาดได้

การเคลือบผิวตามด้วยการขัดเบา ๆ เพื่อเอาส่วนที่สะท้อนแสงมากออกจะทำให้ได้ผลตามที่เราต้องการและยังคงมีผิวเคลือบในบริเวณที่ยากที่จะขัดได้ การเลือกสีของผิวจะทำให้ได้ชั้น

ตอนนี้ แต่การเติมแต่งสีด้านซิดริมีฟปากเป็นข้อห้ามเนื่องจากการขัดหลังเคลือบผิวจะทำให้สีที่แต่งไว้หลุดไปหมด การเคลือบผิวควรจะทำให้ผิวพอร์ซเลนมีความมันเงาปานกลางโดยไม่สูญเสียพื้นผิวหรือมุมมนที่มุมของฟัน ไม่ควรทำการเคลือบที่มากเกินไปด้วย แต่เป็นการยากที่จะได้สีที่ถูกต้องโดยไม่ทำการแต่งสี ซึ่งสีหลัก (hue) จะมีให้เลือกน้อย สีที่ต่างกันเป็นส่วน ๆ อย่างละเอียด การเพิ่มสีจะทำได้ดีโดยใช้เทคนิคการเคลือบสองชั้น (double glaze) ถ้าต้องการผิวที่ถูกต้องและความมันแล้ว เราสามารถทำได้โดยใช้ทั้งการเคลือบผิว เทคนิคการขัด และการแต่งสีเพิ่ม โดยให้ผิวที่ได้มีลักษณะเหมือนฟันธรรมชาติด้วย (stria pattern, perikymata)

เพื่อให้ได้ลักษณะที่เหมือนธรรมชาติ ควรใช้หัวขัดสีเขียว (green abrasive) หัวกรอกากเพชรปลายแหลมและรูวงล้อ ควรใช้หัวกรอกที่มีขนาดเล็กเพื่อทำรายละเอียดของพื้นผิวให้เข้ากับฟันช่องเคียง ตามด้วยหัวขัดข่างรูวงล้อเพื่อทำให้ผิวเรียบ เช่น จุดนูนสุดของส่วนสันกลางฟัน (development lobe) สันขอบฟัน (marginal ridge) และบริเวณที่ถูกกรอแต่ง การใช้หัวกรอกากเพชรที่หยาบและหัวกรอกหินจะทำให้พอร์ซเลนเป็นสะเก็ดและใช้หัวกรอกที่ละเอียดขึ้นกรอต่อจนผิวเรียบขึ้น ก็ยังคงเหลือหลุมเล็ก ๆ ซึ่งยากต่อการขัดจนกว่าจะได้เคลือบผิวได้ ถ้าพื้นผิวพอร์ซเลนมีการปนเปื้อนทั้งจากซิลิโคนหรือหว่าย จะทำให้เกิดแรงดึงผิวสูงได้ ควรทำความสะอาดโดยใช้การเป่าทรายด้วยผงอลูมินาขนาด 25 ไมครอนที่ 40 ความดันบรรยากาศ ตามด้วยเครื่องพ่นไอน้ำหรือเครื่องทำความสะอาดอุลตราโซนิคก็ได้

เทคนิคในการขัดผิวพอร์ซเลนโดยใช้หัวขัดรูวงล้อ (felt wheel) เพื่อทำให้หลุมเล็ก ๆ และรอยกรอเรียบ จะมองไม่เห็นด้วยสายตา แต่จะหลงเหลืออยู่บนชิ้นงานทำให้ดูทื่อทะ การที่จะทำให้ได้พื้นผิวที่มีคุณภาพ ควรใช้วัสดุพิมพ์ซิลิโคนพิมพ์ชิ้นงานที่เสร็จแล้ว เมื่อดูจากแบบหลักจะสามารถบอกได้ว่ารูปร่างและพื้นผิวถูกต้องหรือไม่

การใช้หัวขัดผ้าและหัวขัดรูวงล้อขัดร่วมกับหินพิมพ์มิช ควรเคลื่อนชิ้นงานไปเรื่อย ๆ เพื่อเลี่ยงการเกิดการขัดจนเป็นเส้นขึ้น การใช้หินพิมพ์มิชที่มีขนาดกลางจะทำให้เกิดลักษณะคล้ายผ้าซาตินขึ้น ซึ่งเหมาะกับฟันของคนอายุน้อยและวัยกลางคน การผสมและส่วนเหลวของสารขัดโลหะ จะทำให้เกิดความมันเงามาก การใช้ครีมหากเพชรร่วมกับหัวขัดรูวงล้อจะเพิ่มความมันเงามากขึ้นเหมาะกับคนสูงอายุ ไม่ควรใช้ครีมหากเพชรขัดผิวที่เคลือบแล้ว เพราะจะทำให้มีการสะท้อนแสงมากกว่าความเป็นจริง ผิวควรขัดด้วยหินพิมพ์มิชในขั้นตอนแรก ถ้าต้องการความมันเงาเพิ่มจึงใช้ครีมหากเพชรขัดต่อ การใช้สารขัดที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดความมันเงาแตกต่างกัน

นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาถึงวิธีการขัดแต่งอีกดังต่อไปนี้

Barghi และคณะ (1975) ได้ศึกษาถึงการกรอแต่งพอร์ซเลนด้วยหัวกรอหิน (abrasive stone) พบว่าเมื่อนำไปเคลือบผิวครั้งแรกแล้วได้พอร์ซเลนที่มีความเรียบสูงเพียงพอ ไม่จำเป็นต้องขัดให้เรียบด้วยหัวขัดอื่นก่อนการเคลือบผิว ซึ่งต่างจาก Heywood และคณะ (1988) ที่ได้ศึกษาแล้วพบว่า การทำให้ผิวพอร์ซเลนเรียบจะต้องขัดโดยลดขนาดของอนุภาควัสดุที่ใช้ขัดลงเรื่อยๆ การขัดแต่งด้วยหัวขัดกากเพชรชนิดละเอียด (fine diamond bur) และตามด้วยครีมขัดพอร์ซเลน (diamond finishing paste) เพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ผิวเรียบได้เท่าผิวเคลือบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope) ในการวัดผลและดูจากการสะท้อนแสง (specular reflectance)

Schlissel และคณะ (1980) ได้พบว่าชุดหัวกรอและหัวขัด โชฟู (Shofu polishing kit) โดยหัวกรอซ้ำทำให้ได้ผิวเรียบใกล้เคียงกับผิวเคลือบมากที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆอีก 10 วิธีที่ใช้หัวกรอกากเพชรชนิดหยาบ (course-grit diamond instrument) หัวกรอกากเพชรชนิดละเอียด (fine-grit diamond instrument) หัวกรอรูปร่างล้อ (abrasive wheel) หินพัมมิชขนาดกลางและละเอียดร่วมกับหัวขัดผ้ารูปร่างล้อ (rag wheel mounted) หัวขัดยางชนิดแข็ง (hard rubber wheel) หัวกรอหิน (abrasive stone) ร่วมกันในแต่ละวิธี เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และมีข้อดีคือสามารถควบคุมตำแหน่งที่ต้องการขัดได้ง่ายด้วย ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Klausner และคณะ (1982) ที่ได้ศึกษาวิธีขัดต่างๆ 4 วิธีเทียบกับพอร์ซเลนที่เคลือบผิว ตามลำดับดังนี้คือ วิธีที่ 1 ใช้หัวกรอกากเพชรชนิดละเอียดมาก (superfine diamond) หัวยางขัดรูปร่างล้อดีเคโก (Dedeco wheel) และครีมผสมอะลูมินา (creamy mix of levigated alumina) วิธีที่ 2 ใช้ชุดหัวขัด โชฟู วิธีที่ 3 ใช้หัวกรอกากเพชรชนิดละเอียดมาก หัวยางฝัองอนุภาคขนาดกลาง (cratex polishing wheel) ตามด้วย หัวขัดยางรูปตีกของเบอร์ลิว (Burlew rubber sulci disk) และครีมผสมอะลูมินา วิธีที่ 4 ใช้หัวกรอพอร์ซเลนเจเลนโก (Jelenko porcelain carving) และหัว ขัดรูปร่างล้อเจเลนโก (Jelenko porcelain polishing wheel) พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของการขัดทั้ง 4 วิธีกับผิวเคลือบเริ่มต้น ด้วยค่า ความขรุขระของผิว (surface roughness)

Newitter (1982) ได้ศึกษาวิธีการขัด 10 วิธี โดยใช้หัวขัดชนิดต่างๆร่วมกันคือ หัวยางขัดรูปร่างล้อดีเคโก หินพัมมิชชนิดละเอียด ผงขัดพอร์ซเลน หัวขัดรูปร่างล้อชนิดละเอียด เบอร์ 3 และชนิดละเอียดมาก เบอร์ 5 ของบริษัทเดนสพลาย (Densply) และเจเลนโก และชุดหัวขัดของ โชฟู และผิวเคลือบที่ไม่ได้รับการขัดแต่ง โดยดูจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด

ส่องกราด พบว่า วิธีขัดที่ใช้หัวขัดรูปวงล้อ ตามด้วยหินพัมมิชหรือครีมขัดพอร์ซเลน จะทำให้ผิวเรียบที่สุด ส่วนวิธีที่ใช้ชุดหัวขัดโซฟู แม้ไม่ใช้ร่วมกับหินพัมมิชหรือครีมขัดพอร์ซเลน ก็จะทำให้ผิวเรียบที่พอจะเทียบกันได้

Bessing และ Wiktorsson (1983) ได้ศึกษาเปรียบเทียบพอร์ซเลนที่ผ่านการขัดด้วยวิธีใช้ชุดหัวขัดโซฟูและหินพัมมิชขนาดละเอียด ขนาดเฉลี่ย 40 ไมโครเมตร ร่วมกับผงขัดขอลัก (Slurry of flour of chalk) ขนาดเฉลี่ย 1 ไมโครเมตร พบว่าการขัดด้วยวิธีทั้งสองมีความเรียบมากกว่าผิวเคลือบ และมีความแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างวิธีขัดทั้งสอง แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) ซึ่งประเมินโดยใช้เครื่องมือวัดความขรุขระของผิวและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

Haywood และคณะ (1989) ได้ศึกษาวิธีการขัดโดยใช้หัวกรอกากเพชรขนาดต่าง ๆ ตั้งแต่ 2-35 ไมโครเมตร ครีมกากเพชรสำหรับขัดพอร์ซเลนขนาดอนุภาค 0.025 - 5 ไมโครเมตร หัวกรอกากเพชรสำหรับตัดแต่งขนาด 17 - 75 ไมโครเมตร และหัวกรอคาร์ไบด์ที่มีจำนวนครีบริบตั้งแต่ 8 - 30 ครีบริบรวมกัน จำนวน 47 วิธี โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเป็นเครื่องมือวัด พบว่า เครื่องมือที่มีคุณสมบัติขัดพอร์ซเลนให้เรียบควรจะมีอนุภาคขนาดเล็กและสม่ำเสมอ และควรขัดไปในทิศทางเดียวและเบาเป็นจังหวะจนกระทั่งเรียบแล้วจึงเปลี่ยนเป็นหัวขัดชนิดต่อไป เขาได้แนะนำวิธีขัดที่เรียบที่สุดและเรียบกว่าผิวเคลือบคือ เริ่มกรอด้วยหัวกรอกากเพชรชนิดละเอียด หัวขัดกากเพชร หัวคาร์ไบด์ชนิด 30 ครีบริบ และครีมขัดพอร์ซเลนตามลำดับ แต่วิธีการขัดนี้ใช้เวลานานและยุ่งยาก โดยการใช้ น้ำ และ ไม่ใช้น้ำระหว่างขัดแต่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญในขั้นตอนการขัดแต่ง เมื่อใช้หัวกรอกากเพชรที่ความเร็วปานกลางควรใช้น้ำร่วมด้วย แต่เมื่อใช้หัวกรอคาร์ไบด์ที่ความเร็วสูงไม่ควรใช้น้ำร่วมด้วย

Raimondo (1990) ได้เปรียบเทียบถึงการขัดผิวพอร์ซเลนด้วยครีมขัดพอร์ซเลน 4 ชนิด กับการเคลือบผิว และชุดหัวขัดโซฟูโดยไม่ใช้ครีมขัดพอร์ซเลน ประเมินผลด้วยตาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่า ครีมขัดพอร์ซเลนทรูลัสเตอร์ (Truluster) และไดมอนด์ดัสต์ (Diamond Dust) จะทำให้ผิวเรียบเท่ากับหรือเรียบกว่าผิวเคลือบ เมื่อประเมินด้วยตา ขณะที่เกลซเอ็นชาน์ (Glaze 'N Shine) และเดียกลอสส์ (Dia Gloss) จะขัดผิวไม่เรียบเท่าผิวเคลือบ ส่วนชุดหัวขัดโซฟูที่ไม่ได้ขัดตามด้วยครีมจะเรียบน้อยมาก และยอมรับได้น้อยที่สุด แต่เมื่อประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแล้ว พบว่าผิวเคลือบและ

ครีมขัดพอร์ซเลนทูลัสเตอร์จะมีความเรียบมากที่สุด ส่วนชุดหัวขัดโซฟูจะมีความเรียบมากกว่าจากการดู จึงเหมาะสมที่จะใช้ขัดพอร์ซเลนให้เรียบก่อนขัดตามด้วยครีมขัดพอร์ซเลนต่อไป

Brewer และคณะ (1990) ได้ศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างเคลือบผิวและขัดด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ตามด้วยครีมกากเพชรโดยการดู แล้วประเมินค่าคะแนน 1 ถึง 5 ของไลเคิร์ต (Likert Scale) สำหรับโครงร่าง (outline form) ความพรุน (porosity) ความเรียบ (smoothness) การสะท้อนแสง (reflectance) ลักษณะพื้นผิว (texture) ความทึบแสง (dullness)ตำหนิ (defects) และความสวยงามทั่วไป (general esthetic) ในขั้นตอน 1 เมื่อเทียบผิวเคลือบครั้งแรกเริ่มต้นกับผิวขัด พบว่าผิวขัดจะมีค่าสูงกว่าผิวเคลือบในส่วนของโครงร่างคมกว่า มีการสะท้อนแสงที่เหมาะสม และมีความสวยงามโดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับ และการเคลือบผิวมีค่าสูงกว่าในส่วนของการพรุนและความทึบแสงมากกว่า ในขั้นตอน 2 นำผิวเคลือบและผิวขัดมาเปลี่ยนสภาพพื้นผิวซ้ำ โดยนำผิวเคลือบมาขัดและนำผิวขัดไปเคลือบผิว พบว่าผิวเคลือบจะมีค่าสูงกว่าผิวขัดในส่วนของการสร้างคมกว่าและทึบแสงกว่า ส่วนผิวขัดในขั้นตอน 2 มีโครงร่างที่ไม่ดีเท่าขั้นตอน 1 และมีรูพรุนมากกว่าด้วย แต่ผิวขัดในขั้นตอน 1 จะมีความทึบมากกว่าขั้นตอน 2 ผิวเคลือบในขั้นตอน 1 จะมีความทึบกว่าขั้นตอน 2 ผลทางด้านความสวยงามในขั้นตอน 2 จะมีมากกว่าขั้นตอน 1

Goldstein และคณะ (1991) ได้ทำการประเมินวิธีการขัด 5 วิธีที่นิยมใช้โดยการใช้เครื่องมือวัดความขรุขระของผิว (profilometer) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและการดู พบว่า การใช้หัวขัดยางรูปร่างคล้ายค้อน ขูดหัวขัดโซฟู ครีมขัดพอร์ซเลนทูลัสเตอร์ และชุดขัดพอร์ซเลนของเด็นท์ซัพพลายเหมาะสำหรับการขัดพอร์ซเลนให้เรียบมัน โดยครีมขัดพอร์ซเลนทูลัสเตอร์ขัดได้เรียบกว่าผิวเคลือบ ส่วนครีมเดนแมต (Den-Mat) ขัดแล้วผิวไม่เรียบจึงไม่นิยมใช้ครีมชนิดนี้

Hulterstrom และ Bergman (1993) ได้ศึกษาถึงวิธีการขัดแต่งโดยเปรียบเทียบระบบการขัด 8 ชนิดบนเซรามิก 8 อย่างซึ่งมีการใช้เวลาในการขัดแตกต่างกัน ประเมินด้วยเครื่องมือวัดความขรุขระของผิว พบว่าผิวขัดของผิวที่กรอด้วยหัวกรอกากเพชร ถ้าใช้ชุดซอเฟล็กซ์ (Soflex system) และชุดหัวขัดโซฟู (Shofu porcelain laminate polishing kit) จะได้ผิวเรียบที่สุด โดยใช้เวลา 60 วินาที และการขัดขั้นสุดท้ายด้วยครีมกากเพชรไม่ได้ทำให้ผิวเรียบมากกว่าใช้ชุดซอเฟล็กซ์ แต่ทำให้ผิวเรียบกว่าใช้ชุดขัดโซฟู ความเรียบของเซรามิกที่ขัดด้วยชุด

ขอเพื่อกซ์และชุดหัวขัดโซฟจะดีกว่าผิวเคลือบก่อนที่จะใช้ครีมกากเพชรขัด ครีมนอกเพชรจึงมีผลน้อยมากซึ่งอาจจะไม่ต้องใช้ในการขัดในช่องปาก

Scurria และ Powers (1994) ได้ใช้เครื่องมือวัดความขรุขระของผิวเพื่อเปรียบเทียบความขรุขระที่เกิดจากวิธีการขัดด้วยหัวกรอกกากเพชรขนาด 45 25 และ 10 ไมโครเมตร หัวกรอคาร์ไบด์ชนิด 30 กรีบ หัวขัดยางผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ ( 3 silicon carbide impregnated rubber point ) เจลกากเพชรขนาด 4 และ 1 ไมโครเมตร ( diamond gel ) หัวขัดอะลูมิเนียมออกไซด์ ( aluminum oxide point ) และครีมนอกอะลูมิเนียมออกไซด์ 2 ขนาดบนเซรามิก 2 ( Ceramco 2 ) และไดคอร์เอ็มจีซี ( Dicor MGC ceramic block ) พบว่า เซรามิก 2 สามารถขัดได้เร็วกว่าผิวเคลือบ และไดคอร์เอ็มจีซีสามารถขัดได้เร็วกว่าเซรามิก 2 โดยวิธีการใช้หัวกรอกกากเพชรตามด้วยเจลกากเพชรจะทำให้ได้ผิวเรียบ ส่วนหัวกรอคาร์ไบด์ชนิด 30 กรีบไม่สามารถทำให้ผิวเรียบและการใช้หัวขัดอะลูมิเนียมออกไซด์ ตามด้วยครีมนอกอะลูมิเนียมออกไซด์ ขัดได้เท่ากับหัวกรอกกากเพชรและเจลกากเพชรเมื่อใช้ขัดไดคอร์เอ็มจีซี

Shearer และคณะ (1994) ได้ศึกษาถึงวิธีการขัดวัสดุซีเรค ( Cerec ) ที่ทำจากไดคอร์ เอ็มจีซี ประเมินโดยเครื่องเลเซอร์สะท้อนผิว ( Laser specular reflectance ) พบว่าจาก 6 วิธีที่ใช้ขัดได้ผิวเรียบที่ใกล้เคียงกัน และได้ผิวที่เรียบกว่าพอร์ซเลนที่ใช้กันทั่วไปที่ผ่านการขัดการเคลือบผิว หรือขัดโดยใช้ครีมกากเพชรเพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้ผู้ศึกษาหลายคนได้ศึกษาและผลตรงกันข้าม คือ พบว่าไม่มีวิธีการใดหรือเครื่องมือใดที่สามารถขัดพอร์ซเลนให้เรียบเท่าผิวเคลือบได้

Morrow และคณะ (1973) ได้ศึกษาวิธีการขัด 5 วิธี เทียบกับเคลือบผิวพบว่า ไม่มีวิธีใดเลยใน 5 วิธีที่จะได้ผิวเรียบเท่ากับผิวเคลือบ แต่วิธีที่เรียบที่สุดใน 5 วิธี คือการขัดด้วยวิธีที่ 5 ทำให้ผิวเรียบด้วยหัวกรอรูปวงล้อชนิดหยาบปานกลางตามด้วยหัวละเอียด หินพัมมิชชนิดละเอียดและผงขัดพอร์ซเลนทรูโพลิช ( Tru-polish ) ซึ่งใกล้เคียงกับวิธีที่ 2 และ 4 ที่มีวัสดุในการขัดคล้ายคลึงกัน ประเมินโดยใช้ดาร์ร่วมกับแว่นขยาย

Sulik และ Plekavich (1981) ได้ศึกษาการขัดโดยใช้หัวกรอหินสีเขียวกรอแต่ง ตามด้วยหัวขารูปวงล้อดีเคโก หินพัมมิชชนิดละเอียด และออกไซด์ของดีบุก ( tin oxide ) พบว่าพื้นผิวเรียบเท่ากับผิวเคลือบแต่ถ้ามีหลุมร่องอยู่ก็ไม่สามารถขัดให้หมดไปได้ . ประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด



Smith และ Wilson (1981) ได้ศึกษาการขัดโดยใช้หัวกรอกากเพชร หัวขั้รูปร่างล้อของบุช ( Busch silent wheel ) ให้ผิวที่ยังไม่เรียบเพียงพอ ส่วนการใช้ชุดข้อเฟล็กซ์พบว่า ไม่สามารถร่อนเนื้อพอร์ซเลนที่หนาออกได้ แต่สามารถทำให้เรียบเป็นผิวเนื้อแบบเดียวกันได้ จึงควรใช้หลังกรอแต่งด้วยหัวกรอกากเพชร หรือหัวขั้รูปร่างล้อของบุชจะสามารถเพิ่มคุณภาพของผิวให้เรียบขึ้น ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ประเมินโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

Zalkind และคณะ (1986) ได้ศึกษาวิธีการขัดโดยใช้หัวกรอหินกากเพชร หัวกรอหินคาร์ไบด์ หัวขั้หินสีขาวของโซฟู แผ่นขัดกระดาษทราย (sandpaper disk ) และเป่าด้วยผงอะลูมินัมออกไซด์หลังกรอด้วยหัวกรอหินกากเพชร แล้วนำไปเคลือบผิว พบว่าไม่สามารถทำให้ผิวเรียบได้สมบูรณ์ด้วยการเคลือบผิวเพียงอย่างเดียว . และความเรียบของผิวหลังขัดไม่สามารถทำให้เรียบได้เท่าก่อนขัด สิ่งที่จะเป็นไปได้เพื่อทำให้ผิวเรียบเท่าก่อนขัด คือใช้เป่าด้วยผงอะลูมินัมออกไซด์ก่อนเคลือบผิวซ้ำอีกครั้ง

Campbell (1989) ได้ศึกษาผลของการขัดด้วยวิธีใช้ชุดหัวขั้โซฟู ครีมกากเพชรของวีเดนท์ ( Vident ) และการเคลือบผิวในเซรามิกชนิดไดคอร์และซีเรสตอร์ (Dicor and Cerestore) พบว่าการขัดจะให้ผิวที่หยาบกว่าการเคลือบผิว เมื่อประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

Patterson และคณะ (1991) ได้ศึกษาการขัดโดยใช้ชุดขั้ที่มีขายในท้องตลาดและครีมกากเพชรของชาเมลอน (Chameleon diamond paste) สามารถทำให้ผิวเรียบขึ้นกว่าเดิมจากการกรอด้วยหัวกรอกากเพชรชนิดละเอียดก่อนใช้ชุดขั้และครีมกากเพชรอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่สามารถขัดให้เรียบเท่าผิวเคลือบได้ โดยการประเมินจากเครื่องมือวัดความขรุขระของผิวและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และในปีถัดมา Patterson และคณะ (1992) ได้ประเมินคุณสมบัติของชุดขั้พอร์ซเลนของชาเมลอนที่ใช้ขั้พอร์ซเลนวิตาเดอร์เอ็น (Vitadur N porcelain) หลังการกรอแต่งด้วยหัวกรอกากเพชรชนิดละเอียดและละเอียดมาก (30 และ 15 ไมครอน ) ด้วยความเร็วสูง โดยใช้เครื่องมือวัดความขรุขระของผิวและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าแม้ใช้ชุดขั้หลังกรอแต่งด้วยหัวกรอกากเพชรชนิดละเอียดมากจะทำให้ผิวเรียบกว่าชนิดละเอียดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ก็ไม่สามารถทำให้เรียบเท่าผิวเคลือบได้

Fuzzi และคณะ (1996) ได้ศึกษาความขรุขระของวิตาวีเอ็มเค (Vita VMK porcelain) ภายหลังจากเคลือบผิวและการขัดด้วยวิธีต่าง ๆ 8 วิธี โดยใช้หัวกรอกากเพชรชนิดละเอียด ละเอียดมาก และละเอียดที่สุด ( 30 ,15 และ 8 ไมโครเมตร ) หัวกรอคาร์ไบด์ชนิด

30 กรีป ชุดหัวขัดโซฟู หัวขัดเค็ยฟินีซ (Dia-finish) และเจลกากเพชร 2 ขนาด (Premier Dental Products) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด และเครื่องมือวัดความขรุขระของผิว พบว่าหัวกรอกากเพชรและหัวคาร์ไบด์จะทำให้ผิวเรียบ ขณะที่เค็ยฟินีซและชุดหัวขัดโซฟูจะให้ความมัน ผลจากการประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเพียงอย่างเดียวพบว่า การเคลือบผิวจะให้ผิวที่ดีที่สุดมากกว่าใช้วิธีอื่น ๆ และสนับสนุนการใช้หัวกรอกากเพชรที่มีขนาดละเอียดมากขึ้นว่าจะให้ได้ผลที่ดีขึ้น การใช้หัวขัดชุดโซฟูก็ให้ผลดี แต่เค็ยฟินีซให้ผลที่ไม่ดีนัก และการใช้เจลกากเพชรก็ให้ผลดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการประเมินด้วยเครื่องมือวัดความขรุขระของผิวพบว่า มีเพียงการขัดด้วยหัวกรอกากเพชรชนิดละเอียด ( 30 ไมโครเมตร ) เท่านั้นที่ให้ผลแตกต่างจากผิวเคลือบ โดยมีผิวหยาบกว่าผิวเคลือบ ส่วนกับกลุ่มหัวขัดอื่น ๆ นั้น ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ )

จะเห็นได้ว่าผลการศึกษาแต่ละเรื่องนั้นมีทั้งที่แตกต่างกันและเหมือนกัน จึงเป็นการยากที่จะสรุปว่าวิธีการใดเป็นวิธีที่ดีและเหมาะสมที่สุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## วิธีการวัดความเรียบของผิวพอร์ซเลน (Rank Taylor Hobson Limited chart)

### ตัวแปรที่บอกลักษณะของพื้นผิว

ลักษณะพื้นผิวทางวิศวกรรมเกิดจากการใช้วัสดุหลาย ๆ ชนิดขัดดู ซึ่งลักษณะที่ได้สามารถแบ่งออกได้เป็นองค์ประกอบ 3 อย่างคือ ความหยาบ (roughness) การเป็นลอนคลื่น (waviness) และรูปแบบ (form) ซึ่งโดยทั่วไปพื้นผิวของวัสดุจะถูกขัดออกในแนวทางทั้ง 3 นี้แม้ว่าจะถูกทำด้วยวิธีใด ๆ อาจพิจารณาได้ใน 3 แนวทางคือ

1. ตัวแปรในแนวตั้ง (amplitude parameters) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว
  - 2. ตัวแปรในแนวราบ (spacing parameters) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวที่เกิดขึ้นในแนวราบตามแนวของพื้นผิว
3. ตัวแปรไฮบริด (hybrid parameters) เป็นการวัดความเปลี่ยนแปลง 2 ทางรวมกัน

รูปร่างของพื้นผิว (profile) จะเป็นการพิจารณาพื้นผิวทั้งหมด ซึ่งความหยาบและการเป็นลอนคลื่นจะถูกแยกออกจากกันโดยความยาวของคุณสมบัติคัทออฟ (cut-off) ของเครื่องมือวิธีการทำจะถูกกำหนดไว้ใน BS 1134, ISO 468 และมาตรฐานสากลอื่น ๆ ที่จำเป็น ตามด้วยเครื่องมือของ แรงค์ เทเลอร์ ฮอบสัน (Rank Taylor Hobson)

เมื่อเราแบ่งรูปร่างของพื้นผิวออกเป็นส่วนตามความยาวเพื่อทำการวัด โดยให้ยาวพอที่สามารถมีค่าทางสถิติเพื่อที่จะวัดความหยาบได้ และแน่นอนว่าจะต้องสั้นพอที่จะแยกเอาค่าความเป็นลอนคลื่นออกไป การวัดจะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวจากแนวกึ่งกลาง (central line) เมื่อทำซ้ำ ๆ กัน ไปเรื่อย ๆ ต่อ ๆ กันก็จะสามารถใช้ประมาณค่าความเป็นลอนคลื่นได้ด้วย

ความขรุขระเป็นคุณลักษณะสำคัญของพื้นผิว ซึ่งเป็นผลให้เพิ่มพื้นที่ผิว ความเสียดทานและมีผลต่อการยึดเกาะทางกลของวัสดุอื่นที่มายึดบนพื้นผิว เช่น คราบจุลินทรีย์ การศึกษาทางทันตกรรมมักจะวัดความขรุขระของพื้นผิวและนำมาหาความสัมพันธ์กับการเกาะติดของคราบจุลินทรีย์บนพื้นและวัสดุบูรณะฟัน (Clayton และ Green, 1970) คุณภาพของการขัดทางคลินิก ผิวขัดของวัสดุบูรณะฟัน ความเรียบของชิ้นห้วยงทอง และคุณสมบัติการยึดอยู่ของผิวฟันที่เตรียมแล้ว

ในการทดลองในห้องทดลองและในสิ่งมีชีวิตเกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ของวัสดุ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ขัดแล้วจะมีการตอบสนองของเซลล์น้อยกว่าชิ้นที่ขรุขระ (Henry และ คณะ, 1966 ; Podshadley และ Harrison, 1966 ; Swartz และ Phillips, 1957 ; Podshadley, 1968 ; Stein, 1966)

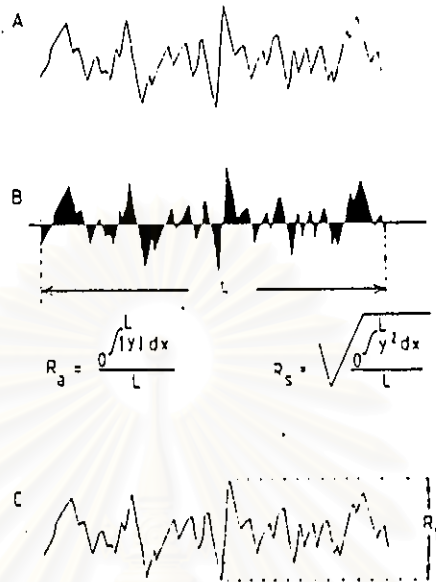
มีหลายวิธีที่จะทำให้รู้ว่าพื้นผิวขรุขระเท่าใด ปัจจัยของความขรุขระวัดได้เป็น ratio of absolute to nominal surface area การวัด absolute area อาศัยปรากฏการณ์ของพื้นผิว เช่น การดูดซึมของก๊าซ และ polarization capacity (O'Corner และ Uhlig, 1957 คัดลอกจาก Leitao และ Hegdahl, 1981) การวัดความขรุขระยังสามารถวัดจากการเกิดการสะท้อนแสงกลับจากพื้นผิวของวัตถุได้ด้วย (Whitehead และคณะ, 1995)

อย่างไรก็ตามการวัดโดยทั่วไปจะวัดจากรูปร่าง (profile) ตามเส้นบนพื้นผิวโดยใช้เครื่องมือลากทางกล (mechanical tracing device) และแสดงความขรุขระโดยความเป็นลอนคลื่นของรูปร่างสัมพันธ์กับค่าฐาน (baseline) หรืออาจแสดงโดยวิธีอื่นได้ ในวรรณกรรมต่าง ๆ ที่มีการวัดความขรุขระมักจะแสดงถึงปริมาณของความขรุขระหรือพารามิเตอร์ (parameter) ซึ่งมักจะไม่มี การเสนอความคิดเห็นกันถึงคุณสมบัติหรืออธิบายว่าทำไมถึงแสดงค่าเช่นนี้ ความขรุขระสามารถอธิบายหรือเกิดขึ้นได้หลายทาง โดยทั่วไปพื้นผิวจะถูกพิจารณาว่าขรุขระ ถ้ามีลักษณะขื่นหรือหุบของแอมพลิจูด (amplitude) สูง และมีความยาวคลื่นสั้น และจะพิจารณาว่าเรียบถ้าความยาวคลื่นยาวแต่ก็จะมีลักษณะเป็นคลื่นด้วย พื้นผิวของผิวเคลือบพื้นสามารถวัดได้เป็นเส้นคลื่น (perikymata) จำนวน 10-30 เส้นต่อม.ม. โดยคิดค่านี้เป็นค่าความขรุขระ

อย่างไรก็ตาม ค่าของผิวเคลือบพื้นค่านี้สามารถพิจารณาเป็นค่าฐานได้ และค่าความขรุขระคือค่าที่แตกต่างไปจากค่าฐาน เมื่อคำนวณความขรุขระในกรณีนี้ มาตรฐานวัดความขรุขระจะต้องถูกปรับแต่งเพื่อแยก long wave oscillation และใช้เฉพาะ short wave เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฐานเดียวกัน ในการศึกษาจะต้องมีการแยกความแตกต่างระหว่างความขรุขระและความโค้ง ในเครื่องวัดความขรุขระสมัยใหม่ สามารถทำได้เพราะเครื่องมือสามารถแยกเอา long wave oscillation ออกไปได้ ในการศึกษาทางทันตกรรม การแยกเอาความหมายของรูปร่างที่โค้งกับความขรุขระออกจากกันดังที่กล่าวข้างต้นมีผู้กล่าวถึงน้อยมากในวรรณกรรมที่น่าออกเผยแพร่

ผลของการวัดขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตัววัสดุ ความนุ่มของวัสดุ การเกิดรูพรุน (Klausner และคณะ, 1982) การออกแบบเครื่องมือ ได้แก่ แบบของตัววัดพื้นผิว (surface tracer) การสะท้อนแสงกลับจากพื้นผิวของวัตถุ (LSR) (Whitehead และคณะ, 1995)

วัตถุประสงค์ของการศึกษาของ Leitao และ Hegdahl (1981) คือตรวจปรากฏการณ์ของการแยกความโค้งออกจากความขรุขระที่มีต่อจำนวนพื้นผิวที่ขรุขระที่ปรากฏวัดได้

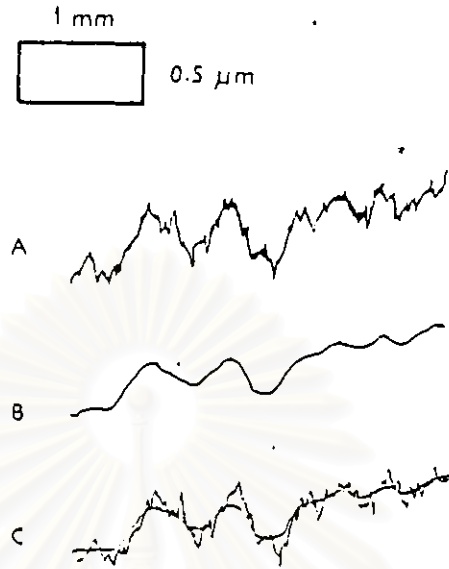


รูปที่ 2-4 แสดงค่าจัดความของค่า  $R_a$ ,  $R_s$  และ  $R_t$

ความหมาย (definition) ในรูป 2-4 A แสดงให้เห็นผิวที่ขรุขระเป็น schematically indicated เมื่อวัดค่าความขรุขระด้วย stylus เคลื่อนผ่านพื้นผิว บันทึกค่าสูงสุดและต่ำสุดที่บอกลักษณะของผิว ขณะที่ stylus เคลื่อนผ่านผิว ส่วนที่ต่างไปจากค่าฐานจะถูกวัดไว้ รูป 2-4 B ค่า  $R_a$  จะถูกคำนวณจากพื้นที่แรเงาหารด้วย scanned length ตามรูป 2-4 จะเห็นว่าถ้าส่วนที่ต่างจากค่าฐานบนและล่างเท่ากันแล้ว ค่า  $R_s$  จะยังคงอยู่ (เป็นค่าบวกเสมอ) ค่า  $R_a$  และ  $R_s$  พารามิเตอร์ มักถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า CLA และ RMS ตามลำดับ ค่านี้จะให้ค่าเฉลี่ยของพื้นผิวที่ stylus ลากผ่าน ค่า  $R_t$  จะเป็นค่าสูงสุดของ peak to valley distance ของชิ้นงาน รูป 2-4 C ความหมายของค่าอื่น ๆ จะพบใน BS 1134

#### การแยก (filtration)

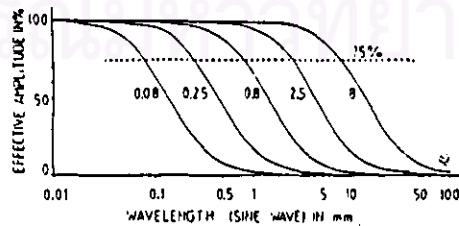
การนำเสนอกายได้ผลของการแยก แสดงโดยใช้ perthometer WSA/ppk (Perthen Mahr, Germany) roughness meter และ perthograph R 100 T5 (Perthen Mahr, Germany) profile recorder



รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะของกราฟที่เกิดจากหัวลาก (stylus)

ในรูป 2-5 A แสดงรูปร่างที่ขรุขระ การขึ้นและหดรากฎในความถี่ที่แตกต่างกัน 2 ค่าความถี่คือ คลื่นยาวและคลื่นสั้น ค่า Ra และ Rs สามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่าที่เปลี่ยนไป จากค่าฐานทั้งด้านบวกและลบ ในกรณีไม่มีการแยก ค่าเฉลี่ยความขรุขระ Ra และ Rs จะเป็นค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อีกด้านหนึ่งถ้ามีคลื่นยาวเกิดขึ้นเข้ามาร่วมด้วย ค่าฐานจะปรากฏ ดังรูป 2-5 B รูปร่างจะมีลักษณะโค้ง และค่าที่นำมาคำนวณจะได้จากเส้นค่าฐานใหม่นี้ ค่า Ra และ Rs จะมีค่าน้อยกว่า ดังรูป 2-5 C ที่โค้งของค่าฐานจะซ้อนทับกับรูปร่างที่ไม่ได้แยก

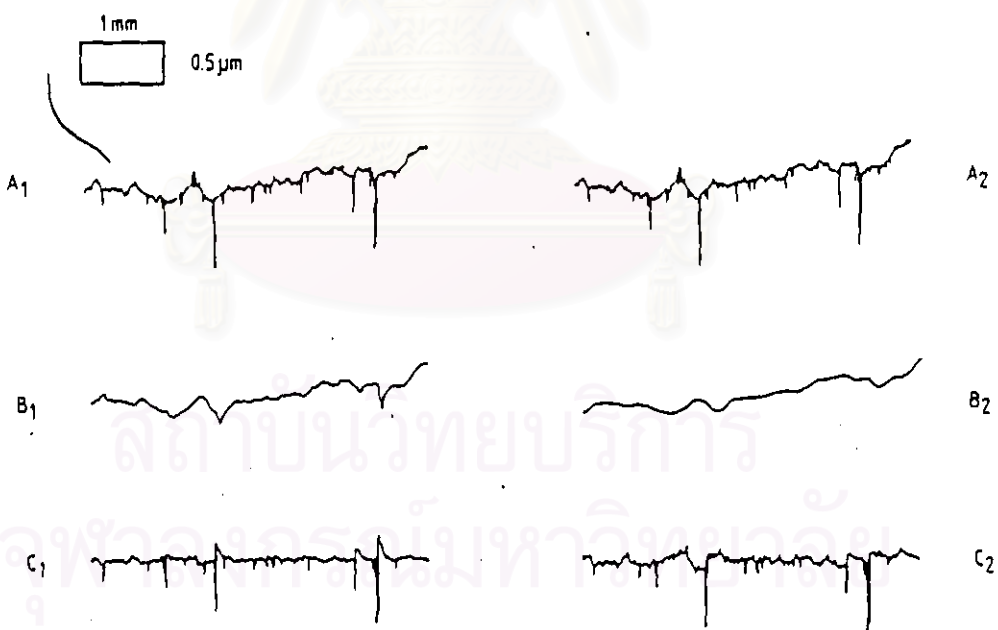
การคำนวณ Ra และ Rs การแยกแสดงให้เห็นถึงการลดลงทีละน้อยในส่วนที่แปรเปลี่ยนไปของปริมาณทางแนวตั้ง เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของการทำงานปรากฏ แสดงว่ามีการลดของรูปร่าง ปรากฏการณ์นี้อธิบายในรูป 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงตัวอย่างของค่าคัทออฟ

เมื่อก้าวถึงรูปร่างในรูปของไซน์ (sine function) ความยาวคลื่นบนแกน X จะเป็นค่า ลอการิทึม (logarithmic scale) ร้อยละของแอมพลิจูดแนวตั้งที่จะนำมาคำนวณ Ra และ Rs จะอยู่ บนแกน Y เมื่อดูโค้งในส่วนกลาง รูป 2-6 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงทางแนวตั้งที่ปรากฏเมื่อมี ความยาวคลื่น 20 ม.ม. หรือมากกว่า จะไม่ใช้ในการคำนวณของความขรุขระทั้งหมด ยิ่งกว่านั้น ถ้าความยาวคลื่น 0.1 ม.ม.หรือน้อยกว่า ส่วนที่เป็นการเปลี่ยนแปลงทางแนวตั้งทั้งหมดจะถูกนำมา คำนวณ Ra และ Rs ระหว่างความยาวคลื่นที่สูงสุดและต่ำสุด การลดลงทีละน้อยในส่วนที่เป็น ผลของแอมพลิจูดของคลื่น (waves' amplitude) ความยาวคลื่นจะเพิ่ม สำหรับกราฟนี้ 75 % ของ แอมพลิจูดของคลื่นจะถูกกระทบจากการคำนวณค่าความขรุขระด้วย เมื่อความยาวคลื่นเป็น 0.8 ม.ม. ค่านี้เรียกว่า ค่าคัทออฟ (cut-off value) ค่าคัทออฟที่สูงกว่าจะได้ค่าความขรุขระมากกว่า ไม่มีการแยกเกิดขึ้นเมื่อค่าคัทออฟเป็นจำนวนมากมายับไม่ถ้วน (infinity) หรือเมื่อค่าฐานเป็นเส้น ตรง

ผลของความเปลี่ยนแปลงในระดับของการแยก (degree of filtration) ในการบันทึก ของผิวอมัลกัมแสดงในรูป 2-7

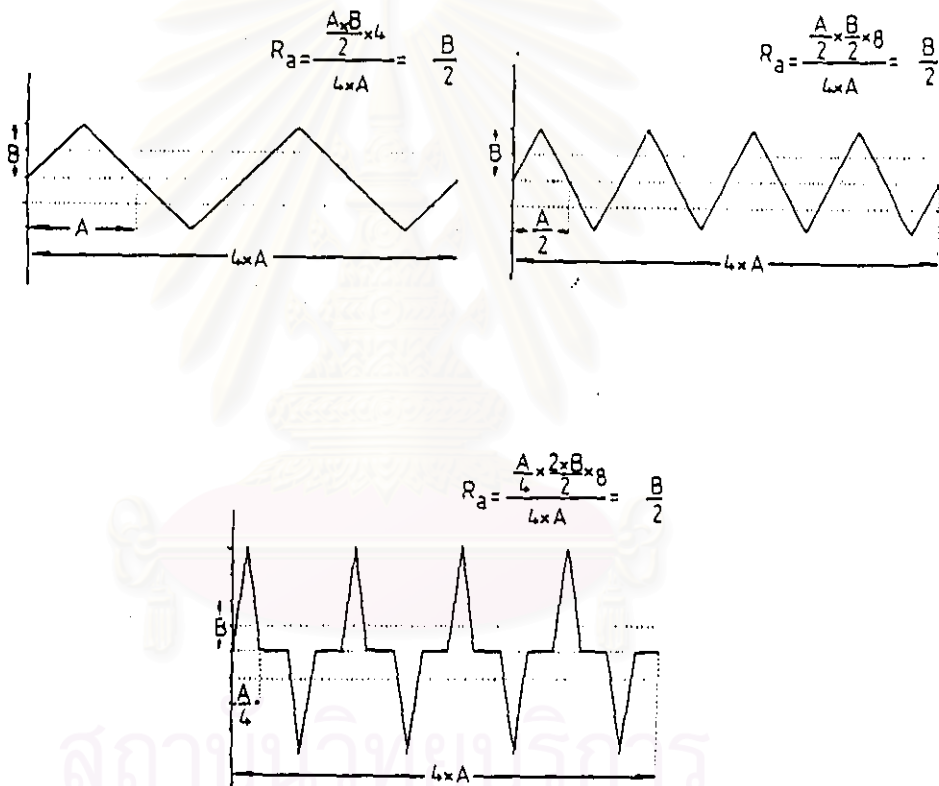


รูปที่ 2-7 แสดงความขรุขระของพื้นผิวอมัลกัมที่ขัดมันแล้วเมื่อใช้ค่าคัทออฟที่แตกต่างกัน

กราฟ 2 รูปบน 2-7 A1 A2 เป็นกราฟอันเดียวกันและเป็นรูปร่างที่ไม่มีการแยก กราฟรูปกลาง 2-7 B1 B2 แสดงค่าฐานที่มีผลจากการใช้ค่าคัทออฟ 0.25 ม.ม. B1 และ 0.8 ม.ม. B2 กราฟต่ำสุด 2-7 C1 C2 แสดงรูปร่างความขรุขระจากค่าความขรุขระที่คำนวณได้ ในกราฟ C1

ค่า  $R_s$  0.54 ไมครอน และค่า  $R_a$  0.34 ไมครอน ในกราฟ C2 ค่า  $R_s$  0.73 ไมครอน ค่า  $R_a$  0.54 ไมครอน พบว่าค่าคัทออฟสูงขึ้นจะเพิ่มค่าความขรุขระ ตัวอย่างในการวัดอมัลกัมที่ขัดเสร็จแล้ว 25 ค่าโดยใช้ scan length 5 มม. ค่า  $R_a$  เพิ่ม 32 % และ ค่า  $R_s$  เพิ่ม 21% เป็นผลจากการเปลี่ยนค่าคัทออฟจาก 0.28 ไปเป็น 0.8 มม.

ค่า  $R_a$  และ  $R_s$  พารามิเตอร์ ค่าความขรุขระที่แตกต่างกันอาจทำให้ได้ค่าที่เหมือนหรือเท่ากันได้ รูป 2-8 แสดงลักษณะรูปร่างของพื้นผิว 3 รูปแบบ



รูปที่ 2-8 แสดงลักษณะของพื้นผิวที่ใช้ค่า  $R_a$  เหมือนกัน

ถ้าดูตามความหมายในรูป 2-4 สามารถที่จะคำนวณค่า  $R_a$  ได้ค่าเดียวกันจากทั้ง 3 รูป ค่า  $R_a$  จึงขึ้นกับแอมพลิจูดและไม่ขึ้นกับการขยายทางแนวราบของจุดสูงสุดและต่ำสุด แสดงว่า  $R_s$  ก็จะเป็นเช่นเดียวกันด้วย เพียงใช้ค่าคัทออฟที่เหมาะสมก็เป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดค่าเดียวกันระหว่างรูปร่างที่แตกต่างกัน



ดังนั้นผลของการวัดค่าความขรุขระขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย มีปรากฏชัดว่าลักษณะของตัวเลขของพื้นผิวที่ขรุขระถึงขีดที่กว้างที่สุดขึ้นอยู่กับทางเลือกค่าพารามิเตอร์ของความขรุขระ เช่นค่า  $R_t$  จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับพื้นผิวทั้งหมดโดยจำกัดและไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างความโค้งและความขรุขระได้ ค่า  $R_t$  มักจะมีค่าสูงกว่าค่าความเป็นจริง ควรจะใช้ค่า  $R_a$  และ  $R_s$  ซึ่งสามารถแสดงผลจากรูปแบบของความขรุขระซึ่งมีมากมาย และสามารถแสดงค่าได้เป็นตัวเลขเดียวกัน แม้ว่ารูปแบบจะแตกต่างกันทั้งทางเรขาคณิตและคุณสมบัติ มีเพียงการแยกเท่านั้นที่สามารถแยกแยะระหว่างตัวมันได้ ถ้าพื้นผิวถูกบอกลักษณะโดยค่าที่สูงในส่วนที่มีฟองอากาศซึ่งไม่สามารถบันทึกได้ถูกต้องสำหรับเหตุผลทางกายภาพเท่านั้น ค่า  $R_a$  จะต่ำกว่าค่าที่คาดไว้

เมื่อเลือกพารามิเตอร์แล้ว จะต้องเลือกค่าคัทออฟด้วย เพื่อสามารถแยกความแตกต่างของความขรุขระและความโค้ง ซึ่งจะให้ค่าที่ถูกต้องที่สุดตลอดการวัด แต่ปัญหาทางสถิติอาจเกิดขึ้นได้จากลักษณะของพื้นผิวที่ดีซึ่งแสดงออกมาในรายงานนี้ ซึ่งค่า  $R_a$  และ  $R_s$  จะถูกชักนำโดยระดับของการแยก เมื่อมีค่าความขรุขระควรบอกค่าคัทออฟด้วย เครื่องวัดความขรุขระบางชนิดไม่มีความสามารถในการทำการแยก ดังนั้นค่าคัทออฟจะเป็นจำนวนมากมาย กำหนดไม่ได้ และค่าฐานจะเป็นเส้นตรง ในเครื่องวัดความขรุขระเครื่องใหม่ ๆ มักจะมีการแยกได้แต่ค่าคัทออฟในบางเครื่องไม่สามารถเลือกได้อิสระเนื่องจากจะเชื่อมกับ scan length เครื่องมือที่ใช้ประโยชน์ได้ดีที่สุดคือเครื่องที่สามารถมีการแยกได้ต่อเนื่องและปรับได้ตามความเหมาะสมในแต่ละกรณีที่เราต้องการ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย