บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

ซี่ฟันปลอม (Artificial teeth)

คุณสมบัติตามอุดมคติของซี่ฟันปลอม *(2)* คือ มีลักษณะภายนอกที่ดี เช่น มีรูปร่าง สี และความโปร่งแสง ไม่แตกต่างจากฟันธรรมชาติ ซี่ฟันปลอมกับฐานฟันปลอมควรทำจากวัสดุที่มีความเข้ากันได้ดี ซี่ฟันปลอมควรจะมีน้ำหนักเบา เพื่อที่จะไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับฟันปลอม นอกจากนี้ซี่ฟันปลอมควรจะมีความแข็งแรง และ ความเหนียว เพื่อต้านทานต่อการหัก ควรมีความแข็งผิว (hardness) เพื่อต้านทานต่อแรงสึกที่เกิดในช่องปาก และ แรงสึกขณะทำความสะอาดฟันปลอม อย่างไรก็ตามซี่ฟันปลอมต้องสามารถถูกกรอแต่งได้ด้วยหัวกรอ เพื่อให้สามารถปรับแต่งการสบฟันได้

วัสดุที่ใช้ผลิตซี่ฟันปลอมในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ *(15)* ได้แก่ซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน ซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซินชนิดไม่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติ (unimproved acrylic resin) และซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซินชนิดปรับปรุงคุณสมบัติ (modified improved resin)

ซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซินชนิดไม่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติ และซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซินชนิดปรับปรุงคุณสมบัติ จะมีข้อดีและข้อด้อยต่างๆกันไป โดยซี่ฟันปลอมที่ทำจากอะคริลิกที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติจะมีความต้านทานต่อการอัด (impact resistance) สูง ซึ่งพบว่าสูงกว่าซี่ฟันปลอมที่ทำจากพอร์ซเลน ทำให้ไม่เกิดความกระทบกระเทือนต่อเนื้อเยื่อใต้ฐานฟันปลอม อีกทั้งยังมีความเหนียว ไม่แตกหักง่าย ยึดได้ดีกับฐานฟันปลอมอะคริลิก ด้วยพันธะเคมี สามารถกรอแต่งได้ง่าย แต่ ก็มีข้อเสีย คือดูดกลิ่น และติดสี อีกทั้งยังไม่ทนต่อเปลวไฟ และสารละลาย ทำให้มีการละลายของพื้นผิว และรานตัว (crazing) จึงทำให้มีความต้านทานต่อการขัดสีต่ำ *(7)* ในขณะที่ซี่ฟันปลอมที่ทำจากอะคริลิก เรซิน ชนิดที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วจะมีความแข็งแรง และมีความต้านทานต่อการขัดสีได้ดีขึ้น

คุณสมบัติของซี่ฟันปลอม

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของซี่ฟันปลอม อะคริลิก เรซิน และ ซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน ปรากฏว่า ทั้งซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน และซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน นั้นสามารถทำให้มีรูปร่างเหมือนฟันธรรมชาติได้ แต่พบว่าซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน จะมีความโปร่งแสง และมีความลึกของสีมากกว่าซี่ฟันปลอมที่ทำจากอะคริลิก เรซิน ดังนั้นซี่ฟันปลอมพอร์ซเลนจึงมีความสวยเหมือนฟันธรรมชาติมากกว่า อย่างไรก็ตามในปัจจุบันพบว่ามีการทำฟันพอร์ซเลน และฟันอะคริลิก เรซินออกมาหลาย รูปร่าง ขนาด สี และ ระดับความเข้มของสี (shade) จึงสามารถเลือกให้เหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละคนได้

การยึดติดของซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซินกับฐานฟันปลอมจะเป็นแบบพันธะเคมี ในขณะที่การยึดติดของซี่ฟันปลอมพอร์ซเลนกับฐานฟันปลอมจะเป็นการยึดติดเชิงกล ซึ่งการยึดติดกับฐานฟันปลอมของฟันทั้งสองชนิดจะยึดติดได้ดีเมื่อสามารถไล่ขี้ผึ้งที่ติดอยู่ที่ฐานซี่ฟันปลอมออกได้หมดขณะที่ทำการลงฟลาส์ก (flask)

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งผิว ระหว่างฟันอะคริลิก เรซิน และฟันพอร์ซเลน พบว่าฟัน พอร์ซเลน มีความแข็งมากกว่าฟันอะคริลิก เรซินมาก โดยพบว่าฟันอะคริลิก เรซินจะสึกง่ายกว่าฟันพอร์ซเลน แต่การที่ฟันพอร์ซเลนมีความแข็งมากๆก็ไม่ได้เป็นผลดีเสมอไป เนื่องจากการที่มันแข็งมากทำให้เป็นการยากที่ทำการกรอแต่งได้ และก่อให้เกิดเสียงเวลาผู้ป่วยเคี้ยว (clicking sound) *(8, 9, 16)* ซึ่งเมื่อเทียบกับฟันอะคริลิก เรซิน ซึ่งพบว่าสามารถกรอแต่งได้ง่ายกว่า

นอกจากนี้ ฟันพอร์ซเลน ยังทำให้เกิดแรงลงสู่สันเหงือกใต้ฐานฟันปลอมมากกว่าฟันอะคริลิก เรซิน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ฟันชนิดนี้มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ จึงไม่ควรเลือกฟันชนิดนี้มาใช้ในกรณีผู้ป่วยที่มีสันเหงือกที่รองรับฟันปลอมไม่ดี และ ผู้ป่วยที่มีระยะห่างระหว่างด้านบดเคี้ยวน้อย (interocclusal distance)

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน และซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน

ซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน	ซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน
-ยืดหยุ่นสูง -ต้านทานการแตกหักได้ -นิ่ม มีความต้านทานต่อการสึกต่ำ -ไม่ละลายเมื่อโดนของเหลวในปาก -มีการเปลี่ยนแปลงมิติได้บ้าง -เปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ง่าย -ยึดติดกับฐานฟันปลอมพลาสติกได้ -สวยงามเหมือนธรรมชาติ -ไม่มีเสียงขณะเคี้ยว หรือ พูด - ขัดแต่งง่าย -มักเกิดการรานตัวถ้าไม่มีสารเชื่อมขวาง	-เปราะแตกง่าย -ร่วน (friable) -แข็ง สึกกร่อนยาก -มีคุณสมบัติเฉื่อยเมื่อโดนของเหลวในช่องปาก -ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมิติ -ไม่ยึดติดกับฐานฟันปลอม ต้องอาศัยการยึดติดทางกล - สวยงามเหมือนธรรมชาติ -อาจมีเสียงกระทบกันได้ขณะใช้งาน -ขัดแต่งยาก -อาจเกิดการแตกหักได้

(ที่มา: ดัดแปลงจาก Craig R.G.1993. Restorative dental material. 19th edition. Chapter 19:536)

ปัจจุบันนี้วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นซี่ฟันปลอมได้แก่ อะคริลิก เรซิน เนื่องจากสามารถทำให้มีรูปร่างที่ดี สะดวกในการนำมาใช้งาน มีความเหนียวสูง และเข้ากันได้ดีกับฐานฟันปลอมอะคริลิก เรซิน ซึ่งจากคุณสมบัติต่างๆดังกล่าวทำให้ซี่ฟันปลอมที่ทำจากอะคริลิก เรซิน ได้รับความนิยมมากกว่าซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน

สมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา (ANSI/ADA Specification No.15 for acrylic teeth)

ระบุคุณสมบัติของฟันอะคริลิก เรซิน ไว้ดังต่อไปนี้

1.วัสดุที่ใช้อาจเป็นโพลีเมอร์ของเอสเตอร์ของกรดอะคริลิกหรือโพลีเมอร์รวมของส่วน ผสมนี้

2.สีและขนาดใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ

3.สามารถยึดกับฐานฟันปลอมอะคริลิกด้วยแรงยึดทางเคมี (chemical bond) ต่อกันไม่น้อยกว่า 315 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (31 เมกะปาสคาล หรือ 4500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 31 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร)

4.ความแข็งผิวนูป (Knoop)ไม่น้อยกว่า 15 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

5.ไม่เปลี่ยนสี

6.ไม่แตกร้าวทั้งก่อนและหลังบ่มอะคริลิก

ข้อกำหนดองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ

ลักษณะของซี่ฟันอะคริลิก เรซิน ตามข้อกำหนด องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (The international organization for standardization) เลขที่ 3336:1993 (ISO 3336:1993) ควรเป็นดังนี้

1.ขนาด (dimension) ของฟัน

ขนาดของฟันที่วัดได้จริง กับขนาดของฟันที่ระบุไว้ในแผนภาพ (mould chart) จะต้องมีขนาดเท่ากัน หรือ แตกต่างกันได้ไม่เกินร้อยละ 5

2.สี (color) และ ความกลมกลืน (blend)

สีของฟันในแผงเดียวกันต้องมีความกลมกลืนกัน และ สีเหมือนกับสีของฟันในแผงเทียบสีฟัน

3.ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (non- biological hazard)

4.ไม่มีรูพรุน (porosity) และข้อบกพร่อง (defect) อื่นๆ เช่น ความขรุขระของซี่ฟัน

5.การขัดผิว (surface finish)

5.1 ภายหลังผ่านขั้นตอนการบ่มเพื่อทำฟันปลอมแล้ว สามารถขัดผิวซี่ฟันปลอมให้เรียบเหมือนก่อนทำการบ่มได้

5.2 สามารถขัดผิวของซี่ฟันภายหลังการกรอด้วยหัวขัด ซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide wheel) ซึ่งมีขนาดผงเล็กกว่า 65 ไมครอน ให้เรียบได้โดยใช้ผงหินพัมมิซ (pumice powder) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate)

6.คุณภาพการยึดติด (bonding) กับฐานฟันปลอมโพลีเมอร์ ซี่ฟันปลอมสามารถยึดกับวัสดุที่ทำฐานฟันปลอมชนิดบ่มด้วยความร้อน (heat polymerized denture base material) โดยฟันที่ผ่านการทดสอบ จะต้องแยกออกจากกันแบบโคฮีซิพ (cohesive) จำนวน 5 ซี่ จากจำนวนทดสอบ 6 ซี่

7.เสถียรภาพของสี (color stability) สีต้องไม่เปลี่ยน หลังแช่น้ำที่อุณหภูมิ 37+ 5องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

8.ฟันมีความต้านทานต่อการซีด (bleaching) การบิดเบี้ยว (distortion) และการเกิดรอยราน โดยไม่มีรอยแตกบริเวณผิวหรือใต้พื้นผิว (surface or subsurface cracking)

9.ขนาดมีเสถียรภาพ (dimension stability) หลังจากอัดอะคริลิก เรซินแล้ว ชี่ฟันต้องมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเกินร้อยละ 2

วิธีการผลิตชี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน

มีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมทำกันอยู่ *(17, 18)* ได้แก่

1.วิธีแยกแบบหล่อ (split mould)

ทำโดยการอัดอะคริลิก เรซิน ลงไปในแบบหล่อที่ทำด้วยโลหะ 2 ชิ้น โดยชิ้นหนึ่งสำหรับด้านใกล้แก้ม อีกชิ้นสำหรับด้านใกล้ลิ้น ซึ่งทำได้ 3 วิธี

1.1 วิธีเปียก (wet method) โดยผสมส่วนผง โพลีเมทิลเมทาคริเลต กับ มอนอเมอร์ เข้าด้วยกัน รอจนถึงระยะอ่อนนุ่ม (dough stage) แล้วจึงอัดเข้าไปในแบบหล่อ จากนั้นจึงนำไปอัดแล้วบ่มให้อะคริลิก เรซิน แข็งตัว

1.2 วิธีแห้ง (dry method) ทำโดยใส่ส่วนผง โพลีเมทิลเมทาคริเลต เข้าไปในแบบหล่อ แล้วจึงใส่มอนอเมอร์เข้าไปผสมจนอิ่มตัว รอจนส่วนผสมถึงระยะอ่อนนุ่มจึงนำไปอัด และบ่มให้ เรซิน แข็งตัว

1.3 วิธีรวมกัน (combination method) เป็นการนำวิธีเปียก และ วิธีแห้งมาใช้ร่วมกัน โดยผสมผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต กับ มอนอเมอร์ รอจนถึงระยะอ่อนนุ่ม แล้วใส่เข้าไป อัดในแบบหล่อ ต่อมานำออกมาตัดส่วนปลายฟันออก จากนั้นเติมโพลีเมอร์สีปลายฟัน แล้วหยดมอนอเมอร์ตาม รอจนส่วนที่เติมเข้าไปใหม่ถึงระยะอ่อนนุ่ม แล้วจึงนำไปบ่มให้อะคริลิก เรซิน แข็งตัว

2.วิธีฉีดเข้าไปในแบบ (injection mould)

วิธีนี้ต้องใช้แบบหล่อพิเศษที่มีทางเข้าสำหรับอะคริลิก เรซิน เพียงทางเดียวโดยใช้เครื่องอบ อบผงโพลีเมอร์ให้อ่อนตัวก่อน แล้วจึงฉีดเข้าไปในแบบหล่อ แล้วปล่อยให้เย็น ซึ่งวิธีนี้จะไม่ใช้มอนอเมอร์ละลายโพลีเมอร์ แต่จะทำให้โพลีเมอร์อ่อนตัวด้วยความร้อน แล้วฉีดเข้าไปในแบบหล่อ

การปรับปรุงคุณสมบัติด้านการสึกของชี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน

การใส่ฟันในตำแหน่งต่างๆ มีจุดมุ่งหมายที่ต่างกัน โดยการใส่ฟันหน้าจะใส่เพื่อความสวยงาม ในขณะที่การใส่ฟันหลังจะใส่เพื่อใช้ในการบดเคี้ยวอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยรักษาระดับความสูงของใบหน้าส่วนล่าง และ ป้องกันการเกิดความผิดปกติของข้อต่อขากรรไกร ดังนั้นชี่ฟันปลอมที่ใช้ในฟันหลังจึงต้องการความแข็งแรงและมีความต้านทานต่อการสึกสูง จึงมีการปรับชี่ฟันปลอมในฟันหลังให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การปรับปรุงคุณสมบัติของชี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน ทำได้หลายอย่าง เช่น การลดความไวในการติดสีให้น้อยลง การเพิ่มความแข็งผิว

ให้มากขึ้น เพิ่มความต้านทานการสึก แต่อย่างไรก็ตามยังต้องคงคุณสมบัติที่ดี เช่น สามารถใช้งานได้ง่าย และราคาไม่แพง *(10, 19)*

มีความพยายามที่จะปรับปรุงคุณภาพของซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน ให้มีคุณสมบัติดีขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การปรับปรุงเพื่อลดการสึก ซึ่งเป็นข้อด้อยสำคัญ โดยการเติมสารเชื่อมไขว้ (cross –linking agent) บางตัว เช่น ไกลคอล ไดเมทาคริเลต (Glycol dimethacrylate) และ ยูรีเทน ไดเมทาคริเลต (Urethane dimethacrylate) ซึ่งสารเชื่อมไขว้จะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันในลักษณะตาข่าย 3 มิติ (three dimension network) ของเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งมีผลป้องกันการแตกราน เพิ่มความต้านทานการสึก และลดการดูดน้ำ ซึ่งจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยลง *(20)* แต่การเติมสารเชื่อมไขว้ก็มีข้อด้อยเช่นกัน โดยจะทำให้ความสามารถในการคืนตัว (flexibility) และความต้านทานการกระแทก (impact resistance) ลดลง ซึ่งเกิดจากเม็ดโพลีเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งเป็นตัวช่วยในการดูดซับหน่วยแรงเค้นกระแทกมีปริมาณลดลง *(21)* นอกจากนี้สารเชื่อมไขว้ที่เติมเข้าไปยังมีผลทำให้การเกิดพันธะเคมีระหว่างซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน กับฐานฟันปลอมเสียไป ซึ่งเกิดจากการที่สารเชื่อมไขว้ทำให้การซึมผ่านของมอนอเมอร์สู่ผิวฟันอะคริลิก เรซิน ได้ลดลง เป็นเหตุให้กำลังแรงยึดระหว่างซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซินกับฐานฟันปลอมน้อยลง *(21, 22)* ตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้ฟันอะคริลิก เรซินมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน จึงมีการเลือกเติมสารเชื่อมไขว้ในปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของซี่ฟันปลอม โดยบริเวณด้านลิ้น และ ด้านเพดานของซี่ฟันปลอมจะมีการเติมสารเชื่อมไขว้น้อย เพื่อให้เกิดการยึดกับฐานฟันปลอมที่ดี ส่วนบริเวณ ด้านริมฝีปากและปลายฟัน ในฟันหน้า ด้านแก้มและด้านบดเคี้ยวในฟันหลังจะมีการเติมสารเชื่อมไขว้ในปริมาณที่สูงเพื่อให้มีความต้านทานต่อการสึกสูง *(20, 23)*

โดยทั่วไปแล้วซี่ฟันปลอม อะคริลิก เรซิน จะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นเคลือบฟัน (outer enamel surface) และ ชั้นเนื้อฟัน (inner dentin layer) ซึ่งชั้นนอกที่เป็นชั้นเคลือบฟันจะเป็นชั้นที่มีความต้านทานต่อการสึกมากกว่าชั้นในที่เป็นชั้นเนื้อฟัน เนื่องจากชั้นเคลือบฟันจะมีสารเชื่อมไขว้เป็นส่วนประกอบในปริมาณที่มากกว่า ในชั้นเนื้อฟัน เพื่อป้องกันการสึกของซี่ฟันปลอม ดังนั้น การกรอฟันอะคริลิก เรซิน เพื่อให้เกิดการสบฟันที่เหมาะสม อาจมีผลทำให้ซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน นั้นสึกง่ายขึ้น *(24, 25)*

ชนิดของซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน *(26)*

1.ซี่ฟันปลอมที่ผลิตจากโพลีเมทิลเมทาคริเลตชนิดเส้น (linear polymethyl methacrylate)

ซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน ในกลุ่มนี้จะทำจากโพลีเมอร์ ชนิดเส้น ทำให้ความแข็งแรงของซี่ฟันปลอมชนิดนี้ จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าซี่ฟันปลอมในกลุ่มอื่นๆ โดยบริษัทผู้ผลิตแต่ละบริษัท จะทำซี่

ฟันปลอมโดยทำเป็นชั้นๆแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มความสวยงาม ตัวอย่างซี่ฟันปลอมในกลุ่มนี้ เช่น ซี่ฟันปลอมของ เมเจอร์ เดนท์ (Major Dent, Major Prodotti Dentari, Italy) และซี่ฟันปลอม เบสิก (Basic, Heraus Kulzer, Germany)

2.ซี่ฟันปลอมที่มีสารเชื่อมขวาง

เป็นซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน ที่เกิดจากการรวมสายโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน 2 สายหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน ทำให้คุณสมบัติต่างๆของซี่ฟันปลอมดีขึ้น แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่

2.1. กลุ่มที่เป็น โคโพลีเมอร์ของเมทิลเมทาคลิเลต และไดเมทาคลิเลต ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น ไตรเอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาคลิเลต (Triethylene glycol dimethacrylate, TEGDMA)

2.2. กลุ่มที่เป็น โพลีเมอร์อะคริลิกที่มีสารเชื่อมขวางปริมาณสูง และเติมวัสดุอัดแทรก เช่น คอลลอยดัล ซิลิกา (colloidal silica)

3.ซี่ฟันปลอมที่มีส่วนผสมของ เรซิน คอมโพสิต

ซี่ฟันปลอมในกลุ่มนี้จะทำขึ้นมาในลักษณะเป็นชั้นๆ หลายๆชั้น ประกอบกันขึ้นมาเป็นซี่ฟันปลอม โดยในส่วนของด้านบดเคี้ยว และด้านริมฝีปากจะเป็นคอมโพสิต เรซิน เพื่อเพิ่มความสวยงามและความทนทาน ส่วนด้านประชิดกับสันเหงือกว่างจะเป็น อะคริลิก เรซินเพื่อให้สามารถยึดกับฐานฟันปลอมได้ ตัวอย่างของซี่ฟันปลอมในกลุ่มนี้ได้แก่ ยามาฮาชิ พีเอ็กซ์ (Yamahashi PX, Yamahashi Dental MFG.CO.,Aichi Pref.,Japan) และ ไอโวคลา พีอี (Ivoclar PE, Ivoclar Vivadent AG.,Schaan, Liectenstein)

การสึก (Wear)

การสึก เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติเมื่อพื้นผิวของวัตถุเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน ซึ่งการสึกนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นจากกระบวนการเพียงกระบวนการเดียว แต่เกิดจากผลรวมของหลายกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างอิสระบนพื้นผิววัตถุ *(27,28)*

สถาบันวิศวกรรมเครื่องกล แห่งสหราชอาณาจักร (The Institution of Mechanical Engineers of United Kingdom) ได้ให้คำนิยามการสึกว่า เป็นการสูญเสียอนุภาคบางส่วนจากบริเวณพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำจากภายนอก ได้แก่ การขัด แรงกระแทก การขูดขีด เป็นต้น

การสึกในช่องปาก คือ การสึกของฟันและวัสดุบูรณะฟัน อันเป็นเหตุให้มีการสูญเสียลักษณะเดิม ของฟัน และวัสดุบูรณะฟันนั้นๆ การสึกในช่องปากนั้นอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุเช่น การสึกของฟันที่เกิดจากการสบฟันนอกหน้าที่ (parafunction habit) เช่น การนอนกัดฟัน ทำให้เกิดการสึกแบบขัดถู (attrition) ของฟันจากการที่พื้นผิวตรงข้ามกันเกิดการขัดสีผ่านกัน การใช้แปรงสีฟันร่วมกับยาสีฟันที่ไม่เหมาะสมก็อาจทำให้เกิด การสึกแบบขัดสี (abrasion) ได้ โดยทั่วไปแล้วการสึกเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ แต่หากเป็นการสึกที่เกิดภายใต้การควบคุม เช่น ระหว่างการกรอขัดแต่ง (finishing and polishing)วัสดุบูรณะฟัน ก็เป็นการสึกที่เกิดประโยชน์ได้ *(20)*

การสึกเป็นกระบวนการที่มีความสลับซับซ้อน เนื่องจากมีหลายปัจจัยเป็นสาเหตุ เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่มาสัมผัสกัน สิ่งแวดล้อม (อาหาร น้ำลาย) แรง เวลา ระยะทาง และ อุณหภูมิ ฯลฯ ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละบุคคล จึงเป็นการยากที่จะทำนายผลการสึกได้อย่างแม่นยำ

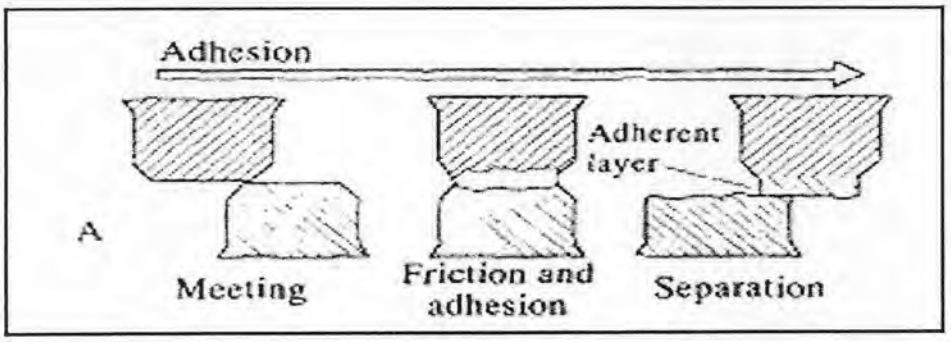
กลไกการเกิดการสึก

การสึกแบ่งออกเป็น 5 แบบ *(27-29)*

1.การสึกยึดติด (Adhesive wear)

เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวของวัตถุหนึ่งเคลื่อนไถลผ่านพื้นผิวของวัตถุอีกชนิดหนึ่ง ผลจากการเสียดสีของสองพื้นผิวนี้ จะทำให้เกิดการหลุดออกของอนุภาคเล็กๆจากพื้นผิวหนึ่ง ซึ่งอนุภาคเล็กๆที่หลุดออกมานี้จะเกิดการเชื่อมติดในลักษณะการเชื่อมกดเย็น (cold welding) ไปบนอีกพื้นผิวหนึ่ง ดังนั้นจึงเกิดการส่งผ่านของอนุภาคจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง

ปริมาตรของการส่งผ่านอนุภาคเล็กๆ จากพื้นผิวของวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ที่วัตถุทั้งสองเคลื่อนผ่านกัน ถ้าเตรียมผิวหน้าของวัตถุให้มีความขรุขระขนาดเล็กจะสามารถเพิ่มการสึกยึดติดได้



รูปที่ 1 แสดงขบวนการเกิดการสึกยึดติดซึ่งเป็นผลของแรงเสียดทาน เกิดเมื่อวัตถุ 2 ชนิดเลื่อนผ่านกัน ทำให้ผิวหน้าบางส่วนของวัตถุหนึ่งเกิดการเชื่อมติดกับผิวหน้าของวัตถุอีกชนิดหนึ่ง

2.การสึกเหตุขัดถู (Abrasive wear)

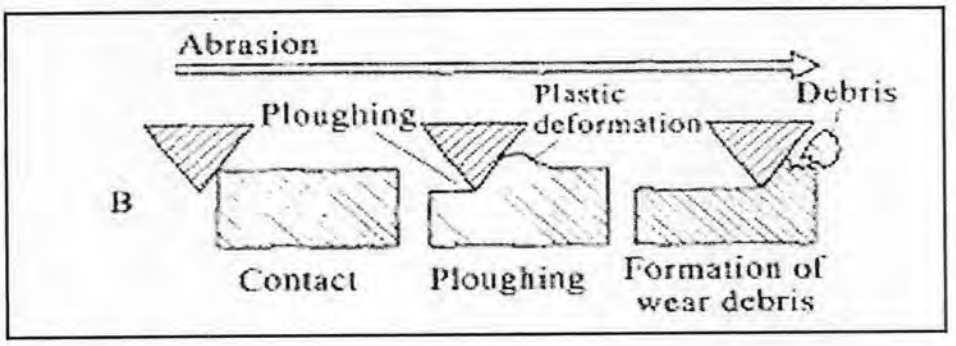
เกิดขึ้นเมื่อวัตถุที่ มีผิวหยาบและ ความแข็งผิวสูง เคลื่อนไถไปบนพื้นผิวที่อ่อนกว่าของอีกวัตถุหนึ่ง ทำให้เกิดการเสียรูปร่างถาวร และอาจพบว่ามีเศษผง (debris) ที่เกิดจากการสึกตกค้างอยู่ที่ผิวของวัสดุได้

โดยทั่วไปปริมาตรการสึกจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความแข็งผิวของวัตถุที่มาสัมผัสกัน ขนาดและรูปทรงของอนุภาคขัดถู (abrasive particle) แรง สารหล่อลื่น และ ระยะทางที่วัตถุมีการเคลื่อนที่ผ่านกัน

การสึกเหตุขัดถูในช่องปากเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น การสึกบริเวณด้านบดเคี้ยว (occlusal wear) การสึกจากการแปรงฟัน (toothbrush abrasion) โดยพบว่าการสึกที่พบที่ด้านประชิด และที่

คอฟัน มักเกิดจากการแปรงฟัน การสึกที่เกิดขึ้น จะมากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะขนแปรง ลักษณะผงขัดในยาสีฟัน ความถี่ในการแปรงฟัน แรงที่ใช้ในการแปรงฟัน ส่วนการสึกที่พบที่ด้านบดเคี้ยวจะเกิดจากการเคี้ยวอาหาร โดยจะสึกมากหรือน้อย ขึ้นกับแรงที่ใช้ในการเคี้ยว และประเภทของอาหาร ที่รับประทานเข้าไป

จากหลักการของการสึกเหตุขัดถูที่ว่า พื้นผิวที่แข็งของวัตถุหนึ่ง เมื่อเคลื่อนไถไปบนอีกวัตถุหนึ่งที่มีพื้นผิวอ่อนกว่า จะทำให้เกิดการเสียรูปร่างอย่างถาวร ของวัตถุที่มีพื้นผิวอ่อนกว่า สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางทันตกรรมได้ โดยการนำมาใช้ทำอุปกรณ์ขัดแต่งวัสดุทางทันตกรรม เช่น ไฟล์ (files) กระดาษขัดแต่งที่มีความหยาบ (abrasive paper) หัวยางรูปลูกล้อ หรือหัวผ้าสำหรับขัด เป็นต้น หรือใช้ในการขยายคลองรากฟันในงานรักษาคลองรากฟัน



รูปที่ 2 แสดงขบวนการเกิดการสึกเหตุขัดถู โดยเมื่อวัตถุที่มีความแข็งผิวสูง เคลื่อนไถไปบนพื้นผิวของวัตถุที่มีความแข็งผิวต่ำกว่า

สามารถแบ่งการสึกเหตุขัดถูได้ออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.1 การสึกเหตุขัดถูสององค์ประกอบ(Two-body abrasion)

คือการสึกเหตุขัดถูที่เกิดจากพื้นผิวที่แข็งและหยาบของวัตถุหนึ่ง เคลื่อนไถไปบนอีกพื้นผิวหนึ่งโดยตรง ไม่มีอนุภาคหยาบใดๆ มาคั่นกลางระหว่างพื้นผิวทั้งสอง เช่น การใช้กระดาษทราย27

เมื่อพิจาณาในช่องปากจะพบการสึกแบบนี้ได้ในผู้ป่วยที่นอนกัดฟัน (bruxism) ผู้ป่วยที่ชอบกัดสิ่งแปลกปลอม เช่น กัดตะปู เป็นต้น การสึกแบบนี้ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของฟันขณะที่ทำการบดเคี้ยว

2.2 การสึกเหตุขัดถูสามองค์ประกอบ (Three-body abrasion)

คือการสึกเหตุ ขัดถูที่เกิดขึ้นโดยมีอนุภาคหยาบของสารที่อยู่ในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) เช่นครีมขัด (polishing pasted) เป็นองค์ประกอบที่สาม คั่นกลางระหว่างพื้นผิวของวัสดุ 2 ชนิด ในขณะที่พื้นผิวทั้งสองนั้นมีการเคลื่อนไถผ่านกัน

ถ้าพื้นผิวที่อ่อนกว่าไม่เรียบ ส่วนที่หยาบไม่เรียบบนผิวที่อ่อนกว่านี้ จะถูกขัดให้เรียบด้วยอนุภาคหยาบที่คั่นกลางระหว่างพื้นผิวทั้งสอง แต่ถ้าพื้นผิวที่อ่อนกว่านั้นเรียบอยู่แล้ว อนุภาคหยาบดังกล่าวอาจทำให้อนุภาคของพื้นผิวที่อ่อนกว่านั้นหลุดออกมาได้

การสึกแบบสามองค์ประกอบ เป็นการสึกที่พบได้ในช่องปากขณะที่ทำการบดเคี้ยว ซึ่งพบได้บ่อยในผู้ป่วยที่ชอบทานอาหารพวกสลัดผักสด หรืออาหารพวกธัญญาพืช

การสึกแบบสามองค์ประกอบ แบ่งได้เป็นสองระยะโดยในระยะแรก ก้อนอาหาร (bolus) ที่อยู่ระหว่างด้านบดเคี้ยวของฟันคู่สบ จะทำหน้าที่เสมือนเป็นอนุภาคหยาบที่อยู่ในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ทำให้เกิดการขัดตลอดทั้งพื้นผิวที่อาหารมีการเคลื่อนผ่าน ซึ่งลักษณะที่สำคัญของการสึกในระยะแรกนี้ คือ พื้นผิวของฟันจะไม่มีการสัมผัสกันโดยตรง การสึกแบบนี้มีแนวโน้มที่จะทำให้พื้นผิวที่นิ่มกว่า เกิดลักษณะเป็นหลุมร่องลงไป ซึ่งในช่องปากเมื่อเกิดการสึกแบบนี้จะพบลักษณะขั้นระหว่างส่วนเคลือบฟัน และส่วนเนื้อฟันในบริเวณปลายฟันหรือด้านบดเคี้ยว ส่วนการสึกแบบสามองค์ประกอบ ในขั้นที่สอง จะพบว่าอนุภาคหยาบที่เหลืออยู่จะเข้าไปฝังอยู่ในหลุมร่องของพื้นผิว ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนพื้นผิวที่มีการเคลื่อนผ่านกัน พื้นผิวที่เกิดการสึกแบบสามองค์ประกอบในขั้นที่สองนี้อาจมีการสัมผัสกันเกิดขึ้นเพราะส่วนของอนุภาคที่ทำให้เกิดการขัดเข้าไปฝังตัวอยู่เป็นส่วนหนึ่งของพื้นผิวแล้ว

3.การสึกกร่อน (Erosive wear) (27)

การสึกกร่อนเกิดขึ้นจากผลของอนุภาคหรือของเหลวภายใต้แรงดัน ตัวอย่างการเกิดการสึกกร่อน เช่นการสึกกร่อนของก้อนหินที่อยู่ใต้น้ำตก และการเป่าทราย (sand blasting) เป็นต้น ลักษณะเด่นของการสึกกร่อนคือการที่ต้องมีตัวกลางที่ทำให้เกิดการสึก (wear medium) เช่น ทราย และน้ำ ซึ่งต่างจากการสึกแบบขัดถู แบบสามองค์ประกอบ ที่ต้องมีอนุภาคกลางอยู่ระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด พบว่าพื้นผิวที่เกิดการสึกแบบ การสึกกร่อน จะมีความหยาบมากกว่าพื้นผิวที่เกิดการสึกจาก การสึกขัดถู

4.การสึกจากการล้า (Fatigue wear)

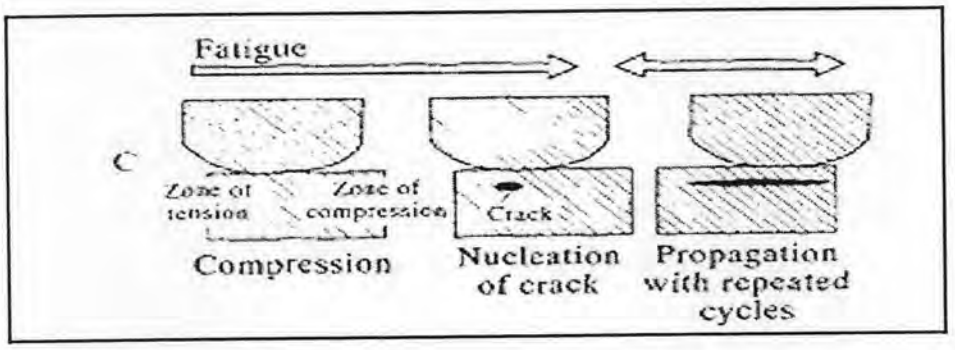
การสึกจากการล้าเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวของวัตถุหนึ่ง เคลื่อนไถผ่านอีกพื้นผิวหนึ่งซ้ำๆ ผลจากการเคลื่อนไถผ่านดังกล่าวทำให้การเปลี่ยนแปลงที่ผิวของวัตถุหนึ่ง 2 รูปแบบ คือ การเกิดบริเวณอัด (zone of compression) และ บริเวณยืด (zone of tension) โดยบริเวณที่ถูกกดจะอยู่ด้านหน้าของทิศทางที่วัตถุมีการเคลื่อนที่ไป ส่วนบริเวณยืด จะอยู่ด้านหลังของทิศทางที่วัตถุเคลื่อนที่ไปบริเวณยืด เกิดจากการที่พื้นผิวของวัสดุเกิดการเสียรูปพลาสติก (plastic deformation)

การสึกลักษณะนี้พบว่าเริ่มแรกจะมีการเกิดของรอยร้าว (crack) ภายใต้พื้นผิวของวัตถุ เมื่อพื้นผิวของวัตถุ 2 ชนิดมีการขัดสีกันซ้ำๆ รอยร้าวดังกล่าวก็จะยาวขึ้นจนมาถึงผิวหน้าของวัตถุ ทำให้

อนุภาคของวัตถุ ที่อยู่รอบๆรอยร้าวนี้หลุดออกจากพื้นผิว ซึ่งอนุภาคของวัตถุที่หลุดออกมานี้อาจไปปนอยู่ในส่วนของเศษผง ที่อยู่ระหว่างผิวของวัตถุทั้งสอง ทำให้เกิดเป็นการสึกขัดถู แบบสามองค์ประกอบต่อไป

การสึกแบบนี้จะขึ้นกับแรงที่กระทำลงไป คือถ้าแรงที่ลงไปมีค่าไม่มากจะไม่พบการเกิดรอยร้าว แต่ถ้าให้แรงลงไปมากขึ้นถึงจุดหนึ่งจะพบรอยร้าวหลายรอย

ในทางทันตกรรมการสึกชนิดนี้เกิดขึ้นตลอดเวลาที่ฟันล่างกระทบ หรือสัมผัสกับฟันบน เช่น เวลาเคี้ยวอาหาร กลืน และขบเน้นฟัน

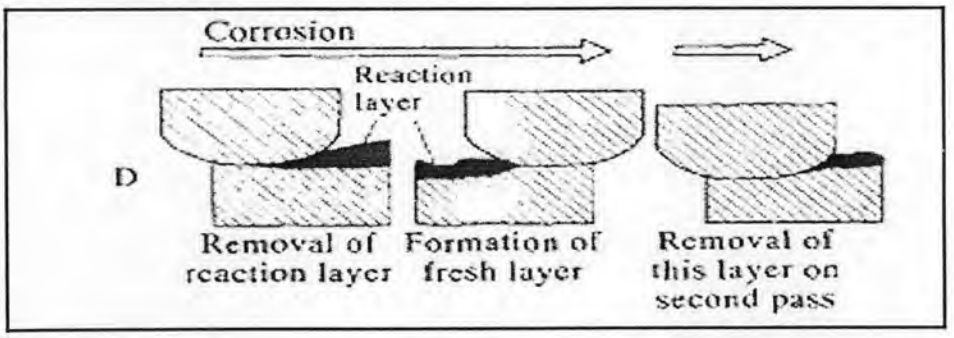


รูปที่ 3 แสดงขบวนการเกิดการสึกจากการล้า เมื่อวัตถุ 2ชนิดเคลื่อนที่ผ่านกันในลักษณะกด หรือกระแทก ทำให้เกิดบริเวณอัด และบริเวณยืด และเกิดรอยร้าวเล็กๆ ภายใต้พื้นผิวของวัสดุ และเมื่อมีการเคลื่อนที่ซ้ำๆ จะทำให้เกิดรอยร้าวที่ยาวขึ้น

5.การสึกแบบกัดกร่อน (Corrosive wear)

Pugh *(30)* ได้ให้คำนิยามการเกิดการสึกแบบกัดกร่อนว่า เป็นรูปแบบหนึ่งของการสึกที่เกิดจากสารเคมี (chemical wear) ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยา ระหว่างสภาวะแวดล้อม กับพื้นผิวที่มีการขัดไถกัน ตามมาด้วยการถูกันของส่วนที่ได้ออกมาจากปฏิกิริยา

การสึกแบบกัดกร่อนที่พบในช่องปาก เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ของสภาวะแวดล้อมในช่องปาก โดยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วจะค่อยๆช้าลง หรือหยุดลง ถ้ามีแผ่นฟิล์มบางๆมาคลุมที่ผิวหน้า แต่ถ้าแผ่นฟิล์มที่คลุมอยู่นั้นหลุดออก ก็อาจเกิดการสึกต่อไปได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการสึกแบบกัดกร่อนของฟันและวัสดุอุด ได้แก่ แรงจากการบดเคี้ยว ที่เกิดจากระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และความเร็วในการเคี้ยว คุณสมบัติในการหล่อลื่นของน้ำลาย คุณลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการบูรณะฟันซึ่งรวมไปถึง องค์ประกอบของวัสดุนั้น ความแข็งของวัสดุ คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุหลังผ่านการผสม และการขัดแต่งแล้ว และคุณสมบัติทางเคมีของสิ่งแวดล้อมในช่องปาก



รูปที่4 แสดงขบวนการเกิด การสึกแบบกัดกร่อน ซึ่งปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเมื่อชั้นปฏิกิริยาตอบสนอง (reaction layer) บนผิวหน้าของวัตถุถูกครูดหลุดออกไป เกิดการสร้างชั้นผิวใหม่ (fresh layer) ขึ้นมา ซึ่งสามารถถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่า

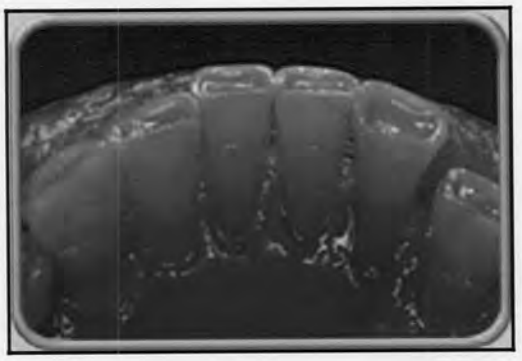
วัสดุที่ใช้ในการบูรณะฟันในช่องปาก ต้องมีคุณสมบัติต้านทานต่อการสึกเพื่อให้คงคุณสมบัติทางกล และมีความสวยงามตามต้องการ เพราะการสึกไม่เพียงแต่ทำให้วัสดุไม่สามารถใช้งานได้อย่างที่ควรจะเป็น แต่ยังอาจทำให้เกิดสารที่เป็นพิษออกมาเป็นอันตรายได้

การสึกในทางทันตกรรม *(27)*

การสึก ซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัสโดยตรง ระหว่างฟันกับอนุภาคอื่น ที่ทำให้เกิดการสึกหรือการสึกระหว่างการบดเคี้ยว ซึ่งอาจมีสารเคมีจากอาหาร หรือกรดที่เกิดจากการสำรอก โดยคำที่ใช้ในการอธิบายการสึกที่เกิดขึ้นในทางคลินิก ทั้งกับฟัน และ ทันตวัสดุ ได้แก่

1.การสึกขัดสี (Attrition)

คือการสึกของฟันที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ฟันมีการสัมผัสกันโดยตรง *(31)* รวมไปถึงการสึกของวัสดุบูรณะฟันที่อยู่บนด้านบดเคี้ยวในตำแหน่งที่ฟันมีการสบสัมผัสกัน32 ซึ่งหากการสึกที่เกิดขึ้นลึกลงไปถึงส่วนเนื้อฟัน อาจพบลักษณะรอยสึกรูปถ้วย (cupping) บนด้านบดเคี้ยวที่เกิดการสึก หรืออาจพบลักษณะเป็นร่อง (groove) ในบริเวณปลายฟัน และอาจพบว่าด้านประชิดของฟันตำแหน่งที่เกิดการสึกแบบขัดสีมีลักษณะแบนราบลง



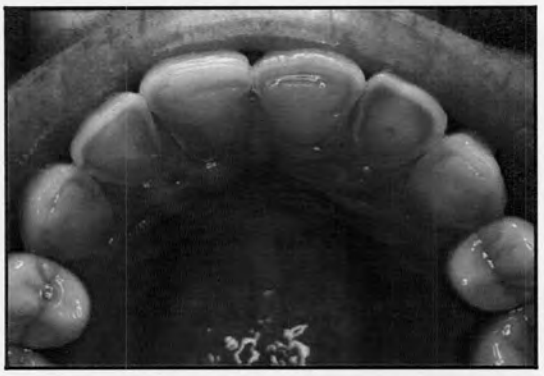
รูปที่ 5 แสดงลักษณะการสึกแบบขัดถูที่พบในฟันธรรมชาติ

2.การสึกกร่อน (Erosion)

ในทางทันตวัสดุการสึกกร่อน คือการสูญเสียส่วนของพื้นผิวของวัสดุบูรณะฟันซึ่งเป็นผลมาจากการไหลผ่านของของเหลว *(33)* ที่มีความเป็นกรด-ด่าง นอกจากนี้การสึกกร่อนยังใช้ในกรณีที่มีการสูญเสียของพื้นผิวของฟันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น อากาศที่มีอนุภาคขัดขนาดเล็กปนอยู่ *(34)* โดยทั่วไปแล้ว การสึกกร่อนใช้กับการสูญเสียพื้นผิวของฟัน โดยเกิดจากกรด ซึ่งไม่ได้สร้างจากแบคทีเรีย *(31)*

ลักษณะทางคลินิกที่อาจพบได้เมื่อเกิดการสึกกร่อนได้แก่ ส่วนเคลือบฟันมีลักษณะเคลือบเงา (glazing) ส่วนของสันฟัน (developmental ridge)หายไป พบหลุมเว้าตื้นๆ บริเวณคอฟัน และ พบว่ามีการสูญเสียเนื้อฟันที่อยู่รอบๆวัสดุบูรณะฟัน

การสึกกร่อนที่เกิดจากกรดสามารถแบ่งย่อยได้หลายกลุ่มตามแหล่งที่ทำให้เกิดกรด เช่น จากอาหาร กรดจากการสำรอก และจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือ อาจแบ่งการสึกกร่อนออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การสึกกร่อนจากภายใน (intrinsic erosion) เมื่อแหล่งที่ทำให้เกิดกรดมาจากในร่างกาย และ การสึกกร่อนจากภายนอก (extrinsic erosion) เมื่อแหล่งที่ทำให้เกิดกรดมาจากอาหารและสิ่งแวดล้อม *(35)*



รูปที่ 6 แสดงการสึกกร่อนที่เกิดจากกรดในอาหาร

3. *การสึกเหตุขัดถู (Abrasion)*

มีผู้ให้คำนิยามลักษณะการสึกเหตุขัดถูในช่องปากไว้หลายแบบ เช่น เป็นการสึกที่เกิดขึ้นบนด้านของฟันที่ไม่ใช่ด้านบดเคี้ยว (นิยามโดยนักทันตวัสดุศาสตร์) จึงเป็นการสึกที่ไม่ได้เกิดจากการเคี้ยวบดถูของฟันกับฟันโดยตรง แต่เป็นการสึกที่เกิดจากวัตถุอื่นๆมาขัดถูบนด้านของฟัน เช่น การแปรงฟันที่ผิดวิธี การคาบกล้องยาสูบ การกัดที่ติดผม เป็นต้น (นิยามโดยนักชีววิทยา)

รูปที่ 7 แสดงการเกิดการสึกเหตุขัดถูที่เกิดจากแปรงสีฟัน

Smith and Knight *(36)* พบว่าเมื่อเปรียบเทียบอุบัติการณ์การเกิดการสึกเหตุขัดถู เทียบกับการสึกแบบอื่นที่พบในช่องปาก พบว่ามีการเกิดขึ้นน้อยกว่าการสึกแบบอื่น

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการสึกในช่องปาก

การสึกของฟันในช่องปากอาจเกิดได้หลายลักษณะร่วมกัน ซึ่งปัจจัยที่ก่อให้เกิดการสึกของฟันได้แก่ แรงจากการบดเคี้ยว ลักษณะอาหารที่รับประทานเข้าไป ประสิทธิภาพในการบดเคี้ยวของแต่ละบุคคล ลักษณะการสบฟัน ความเป็นกรดด่าง และ ปริมาณการไหลของน้ำลาย การทำงานนอกหน้าที่ (parafunction) เพศ แรง ระยะเวลาที่สัมผัสกับฟัน และ อุณหภูมิ

Harrison *(37)* ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของอาหารที่รับประทานกับการสึก โดยอาหารอาจเป็นทั้งสารหล่อลื่น และสารขัดถู จึงเป็นการยากที่จะทำนายผลของอาหารต่อการเกิดการสึก เนื่องจากอาหารหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารละลาย และทำให้เกิดการแตกรานของฟันอะคริลิก เรซิน เช่น แอลกอฮอล์ เป็นตัวทำละลายพันธะเคมี ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสึกมากขึ้นได้

Ogle and David *(4)* ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการสึกของฟันอะคริลิก เรซิน โดยพบว่า ลักษณะของอาหารที่รับประทานมีผลต่อการสึกของฟัน โดยการรับประทานอาหารแข็ง และ ผักดิบ ทำให้เกิดการสึกของฟันมาก และพบว่าซี่ฟันปลอมในขากรรไกรบนจะมีการสึกมากกว่าซี่ฟันปลอมในขากรรไกรล่างโดยซี่ฟันที่มีการสึกมากที่สุดได้แก่ฟันกรามซี่ที่หนึ่ง และฟันกรามน้อยซี่ที่สอง

Khan, Morris, and von Fraunhofer *(38, 39)* ศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานการสึกของฟันอะคริลิก เรซินชนิดที่มีปุ่มฟัน กับ ชนิดที่ไม่มีปุ่มฟัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

สรุป ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสึกของฟันแบ่งตามชนิดของการสึกของฟัน *(40)*

การสึกเหตุขัดถู (Abrasion)

- นิสัยการกัดที่ไม่ดี เช่น การกัดที่ติดผม, การคาบกล้องยาสูบ
- การใช้เครื่องมือทำความสะอาดช่องปากที่ไม่เหมาะสม เช่นใช้แปรงสีฟันขนแข็ง
- วัสดุบูรณะฟัน และฟันปลอม มีพื้นผิวที่หยาบไม่เรียบทำให้เกิดการขัดสี

การสึกขัดสี (Attrition)

- การนอนกัดฟัน (bruxism)
- การสบฟันที่ผิดปกติ (malocclusion)
- อาหาร เช่น การเคี้ยวอาหารแข็ง หยาบ
- อันตรายจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ก้อนหิน กรวด)

การสึกกร่อน (Erosion)

- กรดจากอาหาร (อาหาร และเครื่องดื่ม ที่มีฤทธิ์เป็นกรด)

- กรดจากยา เช่น กรดแอสคอบิก (ascorbic acid)
- กรดที่เกิดจากระบบทางเดินอาหาร
- โรคความผิดปกติในระบบทางเดินอาหาร เช่น Anorexia and Bulimia
- ความผิดปกติทางร่างกายอื่นๆ ที่ทำให้เกิดการอาเจียน เช่น โรคมะเร็ง โรคไต และ โรคตับ เป็นต้น
- กรดจากสิ่งแวดล้อม เช่น จากโรงงานอุตสาหกรรม

การศึกษาเรื่องการสึกของวัสดุทางทันตกรรม *(29)*

การประเมินการสึกของวัสดุทันตกรรมแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1.การศึกษาในสิ่งมีชีวิต (In vivo studies)

การศึกษาเกี่ยวกับการสึกของวัสดุบูรณะฟัน สามารถศึกษาได้ทั้งในสัตว์ทดลองและในผู้ป่วย โดยการศึกษาในสัตว์ทดลองจะไม่ค่อยได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นการยากที่จะนำผลที่ได้จากการทดลองในสัตว์ทดลองมาเปรียบเทียบ เพื่อหาความสัมพันธ์กับการสึกที่เกิดขึ้นในผู้ป่วยจริง ส่วนการศึกษาในคลินิกนอกจากจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการศึกษา และใช้เวลานานแล้วยังอาจพบปัญหาเกี่ยวกับวิธีการวัดผล

การประเมินการสึกในสิ่งมีชีวิตสามารถทำได้ 2 วิธี

1.1 ประเมินการสึกที่เกิดขึ้น โดยประเมินจากสายตา แล้วเปรียบเทียบการสึกที่เกิดขึ้น กับเกณฑ์มาตรฐานในการวัดการสึกของวัสดุนั้นๆ

ข้อด้อยของวิธีนี้คืออาจต้องใช้เวลาในการศึกษานานเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ

1.2 ประเมินการสึกที่เกิดขึ้น ร่วมกับการใช้เทคนิคการจำลองแบบ โดยใช้วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคน พิมพ์ปากผู้ป่วยที่ต้องการศึกษาแล้วนำรอยพิมพ์ที่ได้มาเทด้วยปลาสเตอร์หิน (die stone) หรือ อีพ็อกซี่เรซิน (epoxy resin) แล้วนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(scanning electron microscope) ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จึงมีประโยชน์มากในการศึกษา กลไกการสึกและ ตรวจดูการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว แต่ไม่สามารถใช้วัดปริมาตรที่สูญเสียไปจากการสึกที่เกิดขึ้น การวัดปริมาตรของพื้นผิวที่สูญเสียไป สามารถวัดได้จากเครื่องวัดความขรุขระของพื้นผิว

ข้อด้อยของการศึกษาด้วยเครื่องวัดความขรุขระคือปริมาตรที่สูญเสียไปจากการสึกที่วัดได้จะอยู่ในตำแหน่งที่อยู่ระหว่างตำแหน่งอ้างอิงสองตำแหน่ง ทำให้การวัดปริมาตรการสึกที่สูญเสียไปอาจไม่ได้มาจากตำแหน่งที่มีการสึกมากที่สุด

2.การศึกษาในห้องปฏิบัติการ (In vitro study)

วัตถุประสงค์หลักที่ทำการศึกษาการสึกในห้องปฏิบัติการก็เพื่อนำผลที่ได้ไปอ้างอิงกับการสึกที่เกิดขึ้นในคลินิก เพราะการศึกษาที่เกี่ยวกับการสึกในทางคลินิกจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายมาก และใช้เวลาในการศึกษานาน ซึ่งมีผลต่อการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุทันตกรรม ทำให้การผลิตวัสดุทันตกรรมมีความล่าช้า แต่การศึกษาในห้องปฏิบัติการก็มีข้อด้อยหลายอย่าง เช่น จากการศึกษาของ Harrison พบว่าการศึกษาเกี่ยวกับการสึกในห้องปฏิบัติการไม่สามารถจำลองการสึกที่เกิดขึ้นจริงในทางคลินิกได้ โดยพบว่าแรง ความเร็ว และผงขัดที่ใช้ในการทดสอบการสึกมักมากกว่าสภาวะจริงที่เกิดขึ้นขณะบดเคี้ยว *(41)* นอกจากข้อจำกัดในเครื่องทดสอบการสึกแล้ว ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการนำมาทดสอบการสึกก็มีอิทธิพลต่อการเกิดการสึก โดยถ้าชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดสอบมีขนาดใหญ่เกินไปก็อาจทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบเกิดการผิดพลาดได้

การศึกษาเกี่ยวกับการสึกของวัสดุทันตกรรมในทางคลินิกเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะออกแบบเครื่องมือทอสอบการสึก เพื่อจำลองการสึกที่เกิดขึ้นในช่องปาก มาใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการไปอ้างอิงกับการสึกที่เกิดขึ้นจริงในทางคลินิก

การทดลองในห้องปฏิบัติการแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ

2.1 ระบบใช้วัสดุ 2 ชนิดมาขัดถูกัน (Two body abrasive system)

เป็นการใช้วัสดุชนิดหนึ่งมาขัดถูทำให้วัสดุอีกชนิดหนึ่งสึก โดยวัสดุที่นำมาขัดต้องมีความแข็งผิวมากกว่าวัสดุที่ต้องการทดสอบ เช่น ใช้เคลือบฟันธรรมชาติขัดถูทำให้ฟันเรซินสึก แล้ววัดผลการสึกที่เกิดขึ้นโดยเครื่องวัดความขรุขระผิว

2.2 ระบบใช้วัสดุ 3 ชนิดมาขัดถูกัน (Three body abrasive system)

เป็นการใช้วัสดุชนิดหนึ่งร่วมกับอนุภาคหยาบเล็กๆ ที่มีความแข็งผิวสูงมาขัดถูทำให้วัสดุอีกชนิดหนึ่งเกิดการสึก เช่น การใช้แปรงสีฟันร่วมกับยาสีฟันมาขัดให้ซี่ฟันปลอมเกิดการสึกแล้ววัดผลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อดูสภาพพื้นผิว

การวัดผลการสึก

มีหลายวิธี เช่น

1.วัดจากน้ำหนักที่ลดลง(Weight loss)

ทำโดยเปรียบเทียบน้ำหนัก ก่อนและหลังการทดลอง เช่นการใช้เครื่องแปรงฟันขัดถูซี่ฟันปลอมอะคริลิก เรซิน ร่วมกับการใช้ยาสีฟัน เพื่อทำให้ฟันอะคริลิก เรซินสึกโดยก่อนการทดลองต้องนำฟัน อะคริลิก เรซินไปทำความสะอาดด้วยเครื่อง อัลตราโซนิก โดยใช้น้ำยาทำความสะอาด 15 นาที นำออกจากเครื่อง ล้างน้ำแล้วปล่อยทิ้งให้แห้ง 1 วัน แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบการสึก หลังจากนำฟันอะคริลิก เรซินไปทดสอบการสึกแล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง *(8)*

ปัญหาของการวัดผลด้วยวิธีนี้คือ คุณสมบัติของวัสดุในการดูดซึมและระเหยของน้ำ มีผลต่อน้ำหนักของชิ้นทดสอบ ทำให้ผลของน้ำหนักเปลี่ยนไป *(42)*

2.วัดจากร้อยละของปุ่มฟันที่ลดลง (Percent loss in occlusal height)

โดยการวัดจากความสูงของปุ่มฟันที่หายไป โดยทำการวัดความสูงของปุ่มฟันก่อนและหลังการทดสอบการสึก แล้วนำมาคำนวณโดยการแทนค่าในสูตร *(38, 39)*

$$\text{การสึก} = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \times 100\ \%$$

H_0 = ความสูงของปุ่มฟันก่อนการทดลอง

H_1 = ความสูงของปุ่มฟันหลังการทดลอง

3.วัดโดยใช้แบบจำลอง (Replica)

ทำโดยใช้วัสดุพิมพ์ปากที่สามารถลอกเลียนรายละเอียดได้ดี เช่น วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคน ชนิดที่มีความหนืดน้อย พิมพ์วัสดุที่ต้องการวัดความสึก แล้วนำรอยพิมพ์ที่ได้ไปเทแบบจำลองด้วยเรซิน หรือปลาสเตอร์หิน แล้วนำไปวัดการสึกด้วย เครื่องวัดความขรุขระผิว หรือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิธีนี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีความสามารถในการลอกเลียนรายละเอียดที่ดี สามารถใช้ศึกษาเรื่องการสึกได้ทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพการสึก สามารถใช้ศึกษาในระยะยาวได้ วิธีการไม่ยุ่งยาก *(43)* จากข้อดีต่างๆทำให้วิธีการนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการนำมาศึกษาเรื่องการสึก

ข้อด้อยของวิธีการนี้คือ เป็นการศึกษาการสึกจากแบบจำลองไม่ได้เป็นการศึกษาการสึกโดยตรงจากวัสดุที่ต้องการศึกษาการสึก จึงอาจเกิดการผิดพลาดในด้านการเปลี่ยนแปลงมิติของวัสดุ เช่นการเกิดรูพรุนในเนื้อวัสดุ *(44)*

4.วัดโดยใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว

เป็นการวัดการสึกโดยการดัดแปลงการใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวมาใช้ ซึ่งเครื่องทำงานโดยมีแขนยึดสัมผัสในแนวราบ (horizontal feeler arm) ที่มีหัวเข็มปลายแหลม (gauge) ขนาดต่างๆติดอยู่ตรงปลาย เครื่องจะทำงานโดยการเคลื่อนปลายเข็มผ่านวัสดุที่ต้องการวัดการสึก การเคลื่อนที่ในแนวราบเป็นตัวกำหนดความเร็ว ในขณะที่แนวหัวเข็มที่ขยับขึ้นลงในแนวดิ่งเป็นตัวบันทึกผล และสามารถนำรูปโครงร่างภายนอก (profile) ไปขยายให้ใหญ่ขึ้นในการบันทึกในแนวแกน X-Y จากนั้นนำผลมาเปรียบเทียบ โดยนำโครงร่างภายนอกที่ลากผ่านบริเวณเดียวกันก่อนและหลังการทดลองมาซ้อนทับกัน *(44)* แล้วนำมาคำนวณหาปริมาตรของวัสดุที่หายไปจากการสึกได้

การวัดโดยใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวทำได้ 2 วิธี ได้แก่

4.1 การวัดในลักษณะ 2 มิติ

การวัดในลักษณะ 2 มิติทำโดยใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวที่มีหัวเข็มปลายแหลมลากผ่านพื้นผิววัสดุที่ต้องการศึกษา โดยมีจุดอ้างอิงที่สามารถนำมาเปรียบเทียบผลก่อนและหลังได้ ผลการสึกที่วัดได้คือ ปริมาณการสึกมากที่สุดของบริเวณสัมผัสในแนวดิ่ง และ ค่าเฉลี่ยการสึกของบริเวณที่สัมผัสกับที่ไม่สัมผัส

4.2 การวัดในลักษณะ 3 มิติ โดยใช้เลเซอร์ (Laser profilometer)

เป็นการวัดรูปร่างวัสดุและแสดงออกมาในลักษณะ 3 มิติ มีข้อดีคือสามารถแสดงรูปร่างและลักษณะพื้นผิวที่สแกนได้บนจอแสดงผล ทำให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน และสามารถวัดการสึกได้ในพื้นผิวทุกประเภท *(45)*

5.วัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

เป็นการวัดการสึกโดยดูทั้งลักษณะการสึกและ พื้นผิว ซึ่งจะมีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่มีข้อด้อยที่ต้องใช้ความพยายาม และใช้เวลาในการศึกษามาก *(46)*

6.วัดโดยใช้โฟโตแกรมเมทริก (Photogrammetric)

เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถ่ายรูปในลักษณะ 3 มิติ โดยมีหลักการทำงานจากการทำงานของตามนุษย์ ซึ่งเมื่อมองด้วยตาขวาจะได้รูปภาพแบบหนึ่ง ในขณะที่เมื่อมองด้วยตาซ้ายจะได้รูปภาพอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเกิดจาก ความแตกต่างของแนวแกนตา และเมื่อนำภาพทั้งสองมาซ้อนทับกันโดยกล้องมองภาพ 3 มิติ (stereoscopic) จึงได้รูปในลักษณะ 3 มิติ วิธีนี้จะได้ข้อมูลที่เป็นข้อมูลโดยตรง ไม่มีความผิดพลาดจากการวัด เช่นกรณีวัดจากแบบจำลอง *(32)*

7.วัดโดยใช้สเตริโอโฟโตแกรมเมทรี (Stereophotogrammetry)

เป็นวิธีที่คล้ายกับ วิธีโฟโตแกรมเมทริก แต่ไม่ได้ใช้รูปภาพ เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่ทำให้เกิดภาพสะท้อน (reflex microscopic) ทำให้เกิดภาพในลักษณะ 3 มิติ *(47)* วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถมองเห็นความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยได้อย่างชัดเจนแต่วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพง และต้องใช้ความชำนาญของผู้วัดผล *(48)*

8.วัดโดยใช้คอมพิวเตอร์ 3 มิติ (Three dimension digitizing computer graphic coordinate measuring system)

เป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด เพราะสามารถวัดปริมาณการสึกได้ถึงหลัก มิลลิไมครอน แต่มีข้อจำกัดที่อุปกรณ์มีราคาแพง

วิธีที่ใช้ในการศึกษาเรื่องการสึกของฟันอะคริลิก เรซิน

การศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการสึกของฟันอะคริลิก เรซิน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1.การศึกษาในผู้ป่วย

การศึกษาเกี่ยวกับการสึกของฟันในผู้ป่วยทำได้หลายรูปแบบ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับการสึกในผู้ป่วยที่มีการสบฟันแบบนอกหน้าที่ (parafunction habit) เช่น ผู้ป่วยที่มีประวัติการนอนกัดฟัน ขบเน้นฟัน เนื่องจากความเชื่อที่ว่าจะมีแรงและช่วงเวลาที่ฟันสัมผัสกันเพิ่มมากขึ้น *(49)* เป็นการเพิ่มปริมาณการสึก แต่ไม่เปลี่ยนรูปแบบการสึก บางการศึกษาจะทำในผู้ป่วยที่มีการใส่ฟันปลอมทั้งปาก *(4, 15, 50-52)* หรือฟันปลอมเดี่ยว (single denture) *(4, 16)* นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในลักษณะแบบสอบถามในเรื่องเกี่ยวกับการใช้งานฟันปลอม เช่น ลักษณะอาหารที่ผู้ป่วยชอบรับประทาน ด้านที่ผู้ป่วยถนัดที่จะใช้ในใช้งาน เป็นต้น4 การวัดผลต้องมีจุดอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบผลการสึกก่อนและหลัง

ปัญหาในการศึกษาแบบนี้คือ ค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลาในการศึกษานาน เพราะต้องติดตามผู้ป่วยอย่างต่อเนื่อง และต้องอาศัยความร่วมมือของผู้ป่วยมาก

วิธีที่ใช้ในการวัดผลการสึกของฟันอะคริลิก เรซินในผู้ป่วย

ในอดีตนิยมใช้การวัดผลการสึก จากแบบจำลอง และดูจากความสูงของฟัน ที่เปลี่ยนแปลง ปัจจุบันวิทยาการก้าวหน้ามากขึ้น จึงมีการพัฒนาวิธีการวัดผลการสึกแบบใหม่เพื่อให้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น สามารถแสดงผลความแตกต่างที่เกิดขึ้นแม้ว่ามีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ได้แก่ การวัดผลโดยใช้ สเตริโอโฟโตแกรมเมทริก และการใช้คอมพิวเตอร์ 3 มิติ ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าวเป็นการวัดผลโดยตรงทำให้เกิดภาพ 3 มิติ

2.การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึก มีหลายรูปแบบ แตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง Cornell และคณะ *(7)* ได้กำหนดหลักพื้นฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึก ดังต่อไปนี้

1)เครื่องมือควรมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาวะจริงในคลินิก

2)ผลการทดลองที่ได้ควรสอดคล้องกับผลทางคลินิก

3)เครื่องมือที่ใช้ควรทำให้เกิดรูปแบบการสึกที่เหมือนในช่องปาก

4)ชี่ฟันปลอมที่นำมาใช้ในการทดสอบควรผ่านขบวนการต่างๆเหมือนชี่ฟันปลอมที่ใส่ให้ผู้ป่วย

5)การทดลองควรรวดเร็วพอที่จะสามารถประเมินผลได้ แต่ไม่ควรรวดเร็วมากจนสูญเสียความสัมพันธ์กับสภาวะการใช้งาน

การออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการสึก หรือความต้านทานต่อการสึกของซี่ฟันปลอมมีความแตกต่างกันตามจุดประสงค์การวิจัย และ ผู้วิจัย เช่นการศึกษาเกี่ยวกับการสึกที่เกิดขึ้นกับฟันปลอมซี่หน้าที่ต้องการประเมินด้านความสวยงาม มักใช้เครื่องแปรงสีฟันร่วมกับการใช้ยาสีฟัน โดยมีการกำหนดแรงกดแปรงสีฟัน และจำนวนรอบที่ใช้ในการแปรงซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของคนทั่วไป

ในกรณีของการศึกษาการสึกของซี่ฟันปลอมในฟันหลังซึ่งประเมินด้านการใช้งาน ได้มีการออกแบบเครื่องมือเพื่อใช้ในการศึกษาหลายรูปแบบ เช่น เครื่องมือที่ทำให้เกิดการสึกแบบขัดถู เช่น เครื่องมือทดสอบการสึกของ Myerson (The wear testing machine) ซึ่งสามารถกำหนดแรงที่ใช้ในการทดลองได้ *(25)* เครื่องทดสอบทาเบอร์ (Taber Abraser) ของ Slack ทำให้เกิดการสึกโดยใช้แผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide disk) *(53)* และเครื่องทดสอบการสึกโทเคียว กิเค็น (Tokyo Giken) ซึ่งทดสอบการสึกโดยใช้แผ่นโลหะเป็นตัวทำให้เกิดการสึก โดยใช้วัสดุ 2 ชนิดขัดถูกัน โดยใช้แรงกด 1 กิโลกรัม โดยมีระยะขัด 3 มิลลิเมตร รอบการขัดถู 300 รอบต่อนาที จำนวน 300,000 รอบ *(11, 19)*

ต่อมามีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบให้จำลองสภาพช่องปาก โดยให้มีการขัดถู และแรงกระแทกเหมือนขณะเคี้ยวอาหาร เช่น เครื่องทดสอบการสึกของ Cornell *(7)* เครื่องมือขัดสึก (abrading apparatus) ของ Mahalick ซึ่งมีการลอกเลียนการทำงานของช่องปากและขากรรไกร (stomatognathic system) *(54)* และเครื่องทดสอบการกัดสึก (Biting abrasion testing machine) ของ Ohashi ซึ่งประกอบด้วย กลอุปกรณ์ขากรรไกรจำลองโอคิโน (Okino articulator) นำมาต่อกับเครื่องมือที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ โดยทำให้เกิดการกระแทกและการขัดถู *(55)*

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึก (Wear testing device)

ข้อกำหนดที่เครื่องทดสอบการสึก ควรมีเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ในการทดสอบความต้านทานต่อการสึกของวัสดุ *(56)*

1.แรงและความถี่ (force and frequency) ที่ใช้ในการทดสอบการสึกต้องมีความแม่นยำสูง

2.ผลที่ได้มีความถูกต้องเที่ยงตรง

3.ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการสึกมีความแข็งแรงทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

4.ต้องการ การบำรุงรักษา (maintenance) ต่ำ

ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดของเครื่องมือทดสอบการสึกคือ แหล่งกำเนิดแรง (force generator) ซึ่งแหล่งกำเนิดแรงที่ใช้กับเครื่องทดสอบการสึกก็มีหลายชนิด เช่น ลูกตุ้มถ่วงน้ำหนัก (weight), สปริง (spring), Electrostatic, Piezoelectric, ไฮโดรริก (hydraulic) และ แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) เป็นต้น ซึ่งต่างก็มีข้อดีและข้อด้อยต่างกัน จากการศึกษาพบว่าแม้จะกำหนดปัจจัยต่างๆในการศึกษาเกี่ยวกับการสึกเหมือนกัน แต่หากแหล่งกำเนิดแรงต่างกันก็อาจทำให้ปริมาณการสึกที่เกิดขึ้นของวัสดุต่างกันได้

เครื่องทดสอบการสึก ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อจำลองการเกิดการสึกที่เกิดขึ้นจริงในช่องปากระหว่างกระบวนการบดเคี้ยว ดังนั้นเครื่องทดสอบการสึก ที่สร้างขึ้นมาจึงต้องประกอบด้วยคุณสมบัติที่จำเป็นดังต่อไปนี้

1.แรง (Force)

เครื่องทดสอบการสึกควรมีแหล่งกำเนิดแรงที่ให้แรงในช่วง 20-120 นิวตัน จากการศึกษาในมนุษย์ของ Schindler และคณะ พบว่าแรงกัดในแนวดิ่ง (vertical biting force) ของฟันกรามแท้อยู่ในช่วง 20 -120 นิวตัน และพบว่าแรงเคี้ยวในแนวนอน (horizontal biting force) มีค่าประมาณร้อยละ 35 ของแรงเคี้ยวในแนวดิ่ง

2.รูปแบบของแรง (Force profile)

จากการศึกษาในมนุษย์โดยให้ทำการเคี้ยวอาหารหลายๆชนิด พบว่ารูปแบบของแรงที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้าย คลื่นซายน์ (sine wave)

3.ระยะเคลื่อน (Distance)

จากการศึกษา พบว่าระยะเคลื่อนในแนวดิ่งในการเคี้ยวของมนุษย์ เฉลี่ยวัดได้อยู่ในช่วง16-20 มิลลิเมตร

4.ระยะเวลาสัมผัส (Contact time)

ระยะเวลาสัมผัสระหว่างวัสดุที่ต้องการศึกษาความต้านทานการสึก ควรมีค่าใกล้เคียงกับระยะเวลาสัมผัสจริงที่เกิดขึ้นในทางคลินิก และควรเป็นค่าคงที่ตลอดการทดสอบการสึก จากการศึกษาในมนุษย์ โดยให้เคี้ยวอาหารหลายๆชนิดพบว่าระยะเวลาสัมผัสอยู่ในช่วง 400-600 มิลลิเซคัล (millisecond) ต่อรอบการเคี้ยว

5.การเคลื่อนที่ไถล (Sliding movement)

พบว่าค่าเฉลี่ยการเคลื่อนไถลของ ฟันกรามแท้ซี่ที่หนึ่ง มีค่าประมาณ 0.3 มิลลิเมตร มาทางด้านหน้า (anterior) และ มีระยะไถลประมาณ 0.18 มิลลิเมตร มาทาง ด้านใกล้กลาง (medial side) เครื่องทดสอบการสึกควรสามารถจำลองการเคลื่อนที่ไปด้านข้างเพื่อทดสอบความต้านทานการล้า (fatigue strength) ของวัสดุ

6.การกำจัดอนุภาคของวัสดุที่เกิดจากการสึก (Clearance)

อนุภาคเล็กๆที่เกิดจากการสึกของวัสดุที่นำมาทดสอบการสึก ต้องถูกกำจัดออกไปจากพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบการสึก ซึ่งการกำจัดอนุภาค ที่เกิดจากการสึกของวัสดุอาจทำได้ด้วยของเหลว เช่น น้ำ ชะเอาอนุภาคเล็กๆเหล่านั้นออกจากผิววัสดุ

คุณสมบัติที่เครื่องทดสอบการสึกควรมีเพื่อให้เกิดคุณภาพที่ดีในการศึกษาความต้านทานการสึกของวัสดุ โดยสรุปมีดังต่อไปนี้

- แรงในการเคลื่อนที่ (dynamic force) (48-52 นิวตัน)
- แรงเป็นจังหวะ (force impulse) (9.9-10.1 นิวตันต่อวินาที)
- ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง และด้านข้าง (39-41 มิลลิเมตร ต่อวินาที)
- ความถี่ของรอบการลงแรง (frequency of load cycles) (1.58 -1.62 เฮิรตซ์)
- ระยะเวลาสัมผัส (390-410 มิลลิเซคัล)
- อุณหภูมิของ ambient medium (4.8-5.2 องศาเซลเซียส ต่อ 54.0-56.0 องศาเซลเซียส)

วิธีการทดสอบการสึก (Test method)

วิธีที่ใช้ในการทดสอบการสึกของวัสดุทางทันตกรรมแบบสององค์ประกอบ และ/หรือ แบบสามองค์ประกอบ มีอยู่หลายวิธีตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (ISO) โดยแต่ละวิธีจะมีหลักการทดสอบที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

1.วิธีทดสอบ ดีไอเอ็น (Test method –DIN)

วิธีทดสอบการสึก ดีไอเอ็น มีหลักการทดสอบโดยใช้ชิ้นตัวอย่างทดสอบ 2 ชิ้นเคลื่อนที่ไถลขัดกันโดยมีน้ำหนักกดที่คงที่เป็นตัวกำเนิดแรง ทำการทดสอบในน้ำที่อุณหภูมิห้อง วัดผลการสึกโดยการชั่งน้ำหนัก หรือวัดความสูงของชิ้นทดสอบที่หายไปจากการทดสอบการสึก ในกรณีที่การสึกที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาตรของชิ้นทดสอบไปเพียงเล็กน้อย อาจวัดปริมาตรของชิ้นทดสอบที่หายไปโดย ใช้เครื่องวัดความขรุขระพื้นผิว เลเซอร์ สแกนเนอร์ หรือวิธีอื่นที่เทียบเท่ากันได้ วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุอ้างอิง (reference material) ได้แก่ โพลีเมทิล เมทาคริเลต

2.วิธีการทดสอบการสึก ซูริค (Test method –Zurich)

ทำการทดสอบการสึกของชิ้นตัวอย่างทดสอบในอ่างใส่น้ำ (water bath) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ใช้ยอดฟันของฟันธรรมชาติเป็นคู่ขัดกับชิ้นตัวอย่างทดสอบ โดยวางยอดฟันกดลงเป็นมุม 45 องศากับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ โดยชิ้นตัวอย่างทดสอบจะถูกวางยึดอยู่บนเบ้ายาง (rubber socket) ยอดฟันจะเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้นๆบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ โดยจะเคลื่อนที่ไปกลับเป็นรอบไปเรื่อยๆ จนเกิดเป็นร่องบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง การวัดผลการสึกจะใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว หรือเลเซอร์ สแกนเนอร์ วัดผลเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบการสึก ผลจากการทดสอบจะออกมาในลักษณะความสูงของทั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ และชิ้นตัวอย่างคู่ขัดที่หายไป

3.วิธีทดสอบการสึก โอเอชเอสยู (Test method –OHSU)

ทดสอบการสึกโดย ใช้ส่วนของเคลือบฟันที่อยู่บนยอดฟัน กดลงบนชิ้นตัวอย่างทดสอบผ่านชั้นของอาหาร (food-like slurry) เริ่มแรกส่วนของยอดฟันจะกดลงบนชิ้นทดสอบและเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงบนชิ้นทดสอบด้วยแรงคงที่ 20 นิวตัน เป็นระยะทาง 8 มิลลิเมตร เป็นการทดสอบการสึกแบบขัดถู และในตำแหน่งปลายสุดของระยะเคลื่อนจะมีแรงกดคงที่ขนาด 70 นิวตัน เพื่อให้เกิดการสึกแบบขัดสี โดยแต่ละรอบของการทดสอบจะใช้ความถี่ 1.0 เฮิรตซ์ 50,000 รอบ รูปแบบการสึกที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นการสึกแบบขัดถู และส่วนที่เป็นการสึกแบบขัดสี วัดและวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว โดยวัดและวิเคราะห์ผลทั้งสองส่วนแยกออกจากกัน

4.วิธีการทดสอบการสึก เอซีทีเอ (Test method –ACTA)

หลักการของของทดสอบด้วยวิธี เอซีทีเอ ทำโดยใช้ลูกล้อโลหะ 2 ลูกเคลื่อนที่หมุนในทิศทางตรงข้ามกันโดยลูกล้อทั้งสองจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน ร้อยละ15 ชิ้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปวางติดไว้ที่ขอบด้านในของล้อหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถทำการทดสอบการสึกของชิ้นตัวอย่างทดสอบได้ครั้งล่ะหลายๆชิ้น ในขณะที่อีกลูกล้อหนึ่งทำหน้าที่เป็นคู่ขัด (antagonist) ปรับแรงที่ใช้ในการดันให้ลูกล้อเข้า ให้มีค่าประมาณ 15 นิวตัน วัดผลการสึกด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว หรือวิธีอื่นที่เทียบเท่ากัน โดยวัดจากร่องที่เกิดขึ้นบนชิ้นตัวอย่างทดสอบ และบนชิ้นคู่ขัด

5.วิธีทดสอบการสึก อลาบามา (Test method –Alabama)

ทำการทดสอบการสึกในตัวกลางที่เป็นเม็ดโพลีเมอร์ (slurry of unplasticized polymer bead) ในน้ำ โดยมีส่วนของเข็มกด ที่ทำจากโพลีอะเซทัล (Polyacetal) กดลงบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ แล้วหมุน 30 องศารอบแกนตามยาว แล้วยกขึ้น โดยเข็มกดจะยกขึ้นสู่ตำแหน่งเริ่มต้นทุกครั้งหลังกดและหมุนครบในแต่ละรอบ ชิ้นตัวอย่างทดสอบ ที่ใช้ในการศึกษาการสึกด้วยวิธีนี้ จะถูกฝังลงไปในฟันธรรมชาติ วัดผลการสึกที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคการสร้างแบบจำลอง แล้ววัดด้วย อาร์อีเอ็ม (REM) เหมือนกับการสแกนด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว ผลที่ได้วัดออกมาในลักษณะของความสูงที่หายไปของชิ้นตัวอย่างทดสอบ

6.วิธีการทดสอบการสึก ไฟล์บวก (Test method –Freiburg)

ทำโดยใช้วิธี Modified pin-on-disc test มาปรับใช้ในการทดสอบการสึก โดยนำเข็มเซรามิก (ceramic pin) มาเป็นคู่ขัดกับชิ้นตัวอย่างทดสอบแทนการใช้ฟันธรรมชาติ ชิ้นตัวอย่างทดสอบจะถูกยึดอยู่ในตัวจับรูปถ้วยซึ่งใส่น้ำเอาไว้ ขณะทดสอบจะมีการหมุนของทั้งส่วนเข็มคู่ขัด และชิ้นตัวอย่างทดสอบ โดยจะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน แรงกดจะถูกส่งลงมาตามแกนของเข็มคู่ขัด วัดผลการสึกที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของวัสดุที่หายไป โดยคำนวณจากความลึกที่เกิดขึ้นของรอยสึกบนชิ้นตัวอย่างทดสอบ กับความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุที่นำมาทดสอบ หรือวัดด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว หรือเลเซอร์ สแกนเนอร์ ร่วมกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณผล

7.วิธีการทดสอบการสึก มินเนสโซตา (Test method –Minnesota)

วิธีการทดสอบนี้ออกแบบมาจากหลักการที่ว่า ฟันคู่สบบน จะบดเคี้ยวลงบนฟันล่างในรูปแบบใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่แบบ Sinusoidal โดยรอบการเคลื่อนที่จะประกอบด้วยการกดแรงลง สไลด์และยกแรงขึ้นมีความถี่เท่ากับ 4 เฮิรตซ์ ขณะทดสอบชิ้นตัวอย่างทดสอบจะถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ชิ้นทดสอบจะถูกสแกนด้วยเข็มสแกนก่อน และหลังการทดสอบโดยเก็บข้อมูลเป็น

ลักษณะ 3 มิติ แล้วคำนวณเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำขึ้นโดย คณะทันตแพทย์ มหาวิทยาลัย มินเนสโซตา ประเทศ สหรัฐอเมริกา (University of Minnesota School of dentistry, USA.) การทดสอบการสึกด้วยวิธีนี้ทำได้ครั้งละ 1 ตัวอย่างทดสอบเท่านั้น

8.วิธีทดสอบการสึก นิวคลาสเติล (Test method –Newcastle)

ทดสอบโดยใช้คู่ขัดที่เป็นเซรามิก ทรงกลม หรือส่วนของเคลือบฟันบนยอดฟันเคลื่อนที่ภายใต้แรงกดลงบนชิ้นตัวอย่างทดสอบวัดผลการสึกด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว

นอกจากนี้ ยังมีวิธีทดสอบการสึกอื่นๆที่มีหลายการศึกษา นำไปใช้เพื่อศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานต่อการสึกของวัสดุ เช่น

เครื่องทดสอบการเคี้ยว เอ็มทีเอส (MTS chewing simulator) (56)

เป็นเครื่องจำลองการเคี้ยวเพียงชนิดเดียวที่มีตัววัดแรง (force sensor) เป็นส่วนประกอบ โดยมีแหล่งกำเนิดแรงด้วยระบบไฮโดรลิก เครื่องทดสอบการเคี้ยวนี้ ได้รับการปรับปรุงมาจากเครื่องเอ็มทีเอส ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย ในบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ชีวภาพ (biomechanical) ของอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น สะโพกเทียม เข่าเทียม เป็นต้น ซึ่งเครื่องทดสอบนี้สร้างตามข้อกำหนดของ FDA อย่างเคร่งครัด

เครื่องทดสอบการสึก Willytec (56)

เป็นเครื่องทดสอบการสึกที่ให้ผลการทดสอบค่อนข้างน่าพอใจ และเป็นเครื่องที่สร้างขึ้นตามข้อกำหนดของ GLP หรือ FDA อย่างเคร่งครัด หลักการการทำงานของเครื่องทดสอบนี้ใช้ตุ้มน้ำหนักซึ่งยึดอยู่บนแท่ง (bar) เป็นตัวกำเนิดแรง แท่งนี้จะถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยหลังจากยึดชิ้นทดสอบเข้ากับช่องวางชิ้นทดสอบแล้ว จะมีการวัดมาตรฐาน (calibrate) และกำหนดตำแหน่งอ้างอิง เครื่องทดสอบการสึกนี้ประกอบไปด้วยช่องยึดชิ้นทดสอบ 8 ช่อง โดยแต่ละช่องจะมีแท่งและตุ่มน้ำหนัก ประจำแต่ล่ะช่อง แท่งทั้ง 8 จะถูกเชื่อมด้วยแท่งตามขวาง ซึ่งทำให้เกิดการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบขั้น (step motor) เมื่อเข็มกด กดลงบนชิ้นทดสอบ ตุ้มน้ำหนักก็จะถูกปล่อยลงมา มอเตอร์แบบขั้นสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปด้านข้างได้

การวัดความแข็งผิว (Hardness test)

ความแข็งผิว (Hardness) คือ ความต้านทานการเจาะทะลุ (penetration) หรือการทำให้บุ๋ม (indentation) หรือการขีด (scratching) บนพื้นผิวของวัสดุ วัสดุที่ต้านทานการขีดหรือทำให้บุ๋มได้มาก วัสดุนั้นมีความแข็งผิวสูง แต่ถ้าเกิดรอยขีดลึกหรือบุ๋มได้ง่าย แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งผิวต่ำ *(17)* ความแข็งผิวมีหน่วยเป็น แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่นกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ความแข็งผิวถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ความยากง่ายในการขัดชิ้นงาน และความต้านทานในการเกิดรอยขีดข่วน คุณสมบัตินี้จึงมีความสำคัญในงานทันตกรรม เนื่องจากงานในทางทันตกรรมต้องมีการขัดเรียบมันเงาของชิ้นงานเพื่อความสวยงาม นอกจากนี้การมีรอยขีดข่วนบนชิ้นงานจะส่งผลถึงความล้าของวัสดุนั้น *(20)*

เครื่องมือวัดความแข็งผิวเรียกว่า เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester) โดยหลักการของการวัดความแข็งผิว คือ การใช้น้ำหนักกดผ่านหัวกด (indenter) ไปยังพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบ ทำให้เกิดรอยยุบตัว พื้นผิวที่ถูกกดจะเป็นเนื้อที่ที่วัสดุนั้นๆต้านทานต่อน้ำหนักที่กดในเวลาที่กำหนด ได้เป็นค่าความแข็งของวัสดุ (Hardness number)

$$\text{ค่าหน่วยแรง} = \frac{\text{แรงที่ใช้}}{\text{พื้นที่ที่ถูกกด}}$$

หัวกดจะต้องมีความแข็งผิวสูงกว่าวัสดุที่ทดสอบ รูปร่างหัวกดอาจเป็นทรงกลม พีระมิด ขนมเปียกปูน รอยขีด และแบบอื่นๆแล้วแต่ชนิดของเครื่องมือ

ในการวัดความแข็งผิวมีหลายวิธีแต่มีหลักใหญ่ๆ ที่คล้ายคลึงกัน คือแรงที่ใช้กดนั้นจะต้องมีความจำเพาะซึ่งสามารถที่จะควบคุมแรงได้ สามารถทำซ้ำหลายๆ ครั้งได้ และสามารถที่จะวัดขนาดของรอยกดได้ *(57)*

การทดสอบแต่ละวิธีจะแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีข้อดีและข้อเสียต่างๆกัน การทดสอบทุกแบบ จะขึ้นกับการเจาะของหัวกดขนาดเล็กที่มีรูปร่างสมมาตรกดลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบ การทดสอบแต่ละแบบแตกต่างกันที่ วัสดุที่ใช้ทำหัวกด รูปทรงของหัวกด (geometry) และแรงที่ใช้กด (load) โดยวัสดุที่ใช้ทำหัวกดอาจทำมาจาก โลหะ (steel) ทังสเตน คาร์ไบด์ (tungsten carbide) หรือเพชร (diamond) โดยอาจมีรูปทรงเป็นทรงกลม (sphere) รูปโคน (cone) พีระมิด (pyramid) หรือ เข็ม (needle) ส่วนแรงกดที่ใช้ก็มีตั้งแต่ 1 ถึง 3,000 *(58)*

วัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยได้มาก วัสดุนั้นจะมีความแข็งผิวสูง แต่ถ้าวัสดุมีความต้านทานการกดได้น้อย หรือเกิดรอยกดได้ง่าย แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งผิวต่ำ ความแข็งผิว ความแข็งผิวของวัสดุเป็นสิ่งที่ผู้ใช้ควรรู้ก่อนที่จะทำการเลือกวัสดุนั้นๆมาใช้

วิธีทดสอบความแข็งผิวของวัสดุที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ การวัดความแข็งผิวบริเนลล์ (Brinell Hardness test) การวัดความแข็งผิวรอกเวลล์ (Rockwell Hardness test) การวัดความแข็งผิว วิกเกอร์ (Vicker Hardness test) การวัดความแข็งผิวนูป (Knoop Hardness test) และ การวัดความแข็งผิวชอร์ เอ (Shore A Hardness test)

การเลือกวิธีที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (material of interest) ช่วงของความแข็งผิวที่คาดว่าจะได้ (expected hardness range) และตำแหน่งที่จะวัดบนวัสดุ (desired degree of localization) *(20)*

ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง ทำโดยกดน้ำหนักมาตรฐานลงบนตำแหน่งที่ต้องการทดสอบผ่านหัวกด จะเกิดเป็นรอยหรือการยุบตัวบนผิววัสดุ ซึ่งสามารถที่จะวัดความลึกพื้นผิว และความกว้างของรอยที่เกิดจากการกด ผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งความกว้างของรอยกดจะมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งผิว โดยจะพบว่าถ้าวัสดุที่นำมาทดสอบมีความแข็งผิวสูง จะมีค่าตัวเลขของความแข็งผิวสูงตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้การทดสอบความแข็งผิวนูป ในการวัดความแข็งผิว จะพบว่าพอร์ซเลน มีค่าความแข็งผิวสูงที่สุด คือมีค่าความแข็งผิวสูงประมาณ 600 KHN และตามมาด้วย โลหะไม่มีตระกูล เคลือบฟัน อมัลกัม ทอง และเนื้อฟัน ตามลำดับ

1.ค่าความแข็งผิวบริเนลล์

เป็นการวัดความแข็งผิวด้วยวิธีการกด เป็นวิธีทดสอบความแข็งผิวที่ใช้หัวกดเป็นลูกเหล็กทรงกลมขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางหัวกดมีขนาด 18 มิลลิเมตร ซึ่งจะให้แรงกด 3,000 กิโลกรัมลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทดสอบ ในกรณีที่วัสดุมีความนิ่ม แรงกดที่ใช้ลดลงเหลือเพียง 500 กิโลกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดมีขนาด 5 มิลลิเมตร ดังนั้นรอยกดจึงไม่ลึกมากจนเกินไป ใช้เวลาในการกด 30 วินาที ลักษณะของรอยกดที่ได้จะเป็นวงกลม และค่าความแข็งผิวจะทำการวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด แล้วนำมาคำนวณหาค่าความแข็งผิว *(57)* การใช้หัวกดที่มีรูปร่างกลมจะถูกจำกัดให้ใช้ได้เฉพาะวัสดุที่มีความอ่อนและเหนียว (ductile) เท่านั้น ถ้านำหัวกดทรงกลมมาทดสอบความแข็งผิวของวัสดุที่มีความเปราะ (brittle) เช่น แก้ว พอร์ซเลน หรือ เคลือบฟันจะทำให้พื้นผิวของวัสดุเหล่านั้นแตกกระจาย และรอยกดไม่สม่ำเสมอ ไม่สามารถกำหนดขอบเขตที่แน่นอนได้

ในวัสดุที่อ่อนและเหนียวจะมีการฟื้นตัวกลับคืนมาหรือมีการลดขนาดของแรงกดลง ซึ่งเกิดได้เนื่องจากความเค้นยืดหยุ่น (elastic stress) ที่ยังตกค้างเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุนั้นๆ การทดสอบความแข็งนูป จึงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบแทน เพื่อให้เกิดรอยกดที่ดีขึ้น *(59)*

การทดสอบความแข็งผิวของโลหะบางชนิดจะใช้การทดสอบแบบบริเนลล์ เช่นโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม (Cobalt-chromium alloys), ทองอัดแน่น (Gold condensed), โลหะผสมทอง (Gold alloys), โลหะผสมแพลลาเดียม (Palladium-based dental alloy) และโลหะผสมเงิน - แพลลาเดียม (Silver-palladium alloys) *(57)*

การวัดความแข็งผิวชนิดนี้ จะใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับการทดสอบโลหะในอุตสาหกรรม ได้แก่ การทดสอบอิทธิพลของความเย็นและความร้อนต่อโลหะในส่วนที่แตกหัก การทดสอบพื้นผิวของผลิตภัณฑ์โลหะที่ผ่านการขัดโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย เช่น เพลารถ และรางรถไฟเป็นต้น *(60)*

2.การวัดความแข็งผิวแบบรอกเวลล์

เป็นการวัดความลึกของรอยกด ภายใต้แรงกดที่คงที่ โดยใช้หัวกดเหล็กกล้าทรงกลม (Hardened steel balls) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว และแรงกดหลัก 100 หรือ 150 กิโลกรัม โดยขณะทดสอบวัสดุจะต้องทำมุม 120 องศากับหัวกด แรงกดรองจะมีขนาด 10 กิโลกรัม ซึ่งเป็นแรงที่เริ่มกดในช่วงแรกจนกว่าวัสดุจะแนบสนิทกับหัวกดดีเสียก่อน หลังจากนั้นเครื่องจึงจะเริ่มกดด้วยแรงกดหลัก และความลึกของรอยกดจะถูกบันทึกโดยอัตโนมัติ โดยการวัดด้วยไดเอลเกจ (dial gauge) ค่าที่ได้ออกมาจัดเป็นรอกเวลล์สเกล (จัดเรียงเป็นสเกล A-G) ความแตกต่างของสเกลของวัสดุที่แตกต่างกันหมายถึง ระดับความแข็งผิวที่ต่างกัน

การวัดความแข็งผิวแบบรอกเวลล์ ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศอเมริกา เพราะมีความรวดเร็วและไม่มีความคลาดเคลื่อนจากบุคคลในการวัด รอยที่กดได้มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นพื้นผิวของวัสดุจะไม่ถูกทำลายเสียหายหลังจากการวัดความแข็งผิว การวัดด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับวัสดุทั่วๆไป และโลหะ

การวัดความแข็งผิวแบบรอกเวลล์ให้ได้ค่าที่ถูกต้องมีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้ หัวกดและพื้นผิวของวัสดุที่จะทำการทดสอบต้อง สะอาด แห้ง มีพื้นผิวเรียบ และทำมุมที่ถูกต้องกับหัวกด วัสดุมีความหนาเพียงพอที่รอยกดจะไม่ทะลุลงไปอีกด้านของพื้นผิววัสดุ โดยวัสดุต้องมีความหนาอย่างน้อย 10 เท่าของความลึกของรอยกด การเว้นช่วงระหว่างรอยกดแต่ละรอยจะต้องมีระยะอย่างน้อย 4 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และแรงกดจะต้องเท่ากับมาตรฐานที่กำหนด *(60)*

3.การวัดความแข็งผิวชอร์ เอ

วิธีนี้จะนำมาใช้ในการวัดความแข็งผิวของยาง หรือพลาสติกที่อ่อนนุ่ม โดย ชอร์ เอ สเกล จะแบ่งเป็น 0 ถึง 100 หน่วย ถ้าวัสดุถูกกดได้มากก็จะมีสเกลเป็น 0 แต่ถ้าไม่สามารถกดให้เป็นรอยได้เลย จะมีค่าเท่ากับ 100 โดยเครื่องมือที่ใช้วัดความแข็งผิวชนิดนี้เรียกว่า ชอร์ เอ ดูโลมิเตอร์ (Shore A durometer)

หัวกดที่ใช้เป็นรูปทรงกรวย โดยปลายของหัวกดจะมีลักษณะเป็นเข็มปลายทื่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร และด้านฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร วัสดุที่ถูกนำมาใช้วัดด้วยวิธีนี้ ได้แก่ วัสดุบุฐานฟันปลอม (denture liner-resilient) วัสดุพิมพ์ปาก (impression material) วัสดุบูรณะช่องปากและใบหน้า (maxillofacial materials) และ วัสดุทำอุปกรณ์ป้องกันปาก (mouth protector material) *(58)*

4. การวัดความแข็งผิวนูป

หัวกดของเครื่องวัดความแข็งผิวนูป ทำมาจากเพชรเหมือนหัวกดเครื่องวัดความแข็งผิววิกเกอร์ แต่จะต่างกันที่รูปร่างและขอบเขตของหัวกด โดยหัวกดของเครื่องวัดความแข็งผิวนูปจะได้รอยกดเป็นสี่เหลี่ยมที่มีเส้นทแยงมุมเส้นหนึ่งยาวกว่าอีกเส้นหนึ่ง คล้ายกับสี่เหลี่ยมด้านขนาน และจะทำการวัดความยาวของเส้นทแยงมุมที่ยาวกว่าเพียงเส้นเดียวเท่านั้น แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นค่าความแข็งผิวนูป (Knoop Hardness Number-KHN) ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักที่กดกับพื้นที่ของรอยกด โดยคำนวณจากสูตร

$$KHN = \frac{L}{l^2 Cp}$$

หน่วยที่ใช้ในการวัด คือ Kg/ mm^2 เมื่อ L คือน้ำหนักที่ใช้กด l คือความยาวของเส้นทแยงมุมที่ยาวกว่าของรอยกด และ Cp คือค่าคงที่ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของค่า l ต่อพื้นที่ของรอยกด

ข้อดีของการทดสอบด้วยวิธีนี้ คือ สามารถทำการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งผิวหลายช่วง เนื่องจากเครื่องนี้ถูกออกแบบมาให้สามารถเปลี่ยนน้ำหนักได้หลายค่า ดังนั้นผลที่ได้ก็จะแปลตามน้ำหนักที่กด และลักษณะของวัสดุนั้น

การทดสอบความแข็งผิววิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะ เช่น แก้ว ผิวเคลือบฟัน เนื้อฟัน ตัวขัด (abrasives) ซีเมนต์ (cements- luting consistency) ซีเมนต์ไลเนอร์ (cement liners) โลหะผสมโคบอลต์ –โคเมียม และ เรซินที่ใช้ในทางทันตกรรม (denture resins) *(58, 60)*

5.การวัดความแข็งผิววิกเกอร์

วิธีนี้ใช้หัวกดพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่ทำมาจากเพชรซึ่งมีมุม 136 องศา แรงกด 5-120 กิโลกรัม เหมาะสำหรับการใช้วัดความแข็งผิวของวัสดุที่มีความเปราะ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการวัดความแข็งผิวของฟันธรรมชาติ และฟันปลอม โดยวิธีนี้มีหลักการคล้ายคลึงกับการทดสอบความแข็งผิวนูป และบริเนลล์ แต่มีความต่างกันตรงที่หัวกดที่ใช้ในวิธีนี้เป็นหัวกดรูปพีระมิด แรงกดทำให้เกิดรอยกดคล้ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนผิววัสดุ ค่าความแข็งผิวของวัสดุวัดได้จาก เส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งสองเส้น นำมาหาค่าเฉลี่ย แล้วคำนวณออกมาเป็นค่าความแข็งผิววิกเกอร์ (Vicker's Hardness Number-VHN)

ทั้งการวัดความแข็งผิววิกเกอร์ และการวัดความแข็งผิวบริเนลล์ ต่างถูกนำไปใช้วัดความแข็งของโลหะผสมที่ใช้ในทางทันตกรรม โดยค่าความแข็งผิววิกเกอร์–บริเนลล์มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$VHN = 1.05x\ BHN$$

การคำนวณหาค่า VHN จะคำนวณได้จาก

$$\text{ค่าหน่วยของแรง} = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{D^2}{1.854}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad VHN = \frac{1.854A}{D^2}$$

F คือน้ำหนักที่ใช้กด (กิโลกรัม)

A คือ รอยกดรูปพีระมิดของหัวกด

D คือ เส้นทแยงมุมของรูปพีระมิด (มิลลิเมตร)

การทดสอบความแข็งผิวนูป และวิกเกอร์ จัดเป็นการทดสอบความแข็งผิวจุลภาค (microhardness test) ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบความแข็งผิวบริเนลล์ และรอกเวลล์ ที่จัดเป็นการทดสอบความแข็งผิวมหภาค (macrohardness test) ซึ่งใช้แรงกดที่สูงกว่า *(20)*

การทดสอบความแข็งผิววิกเกอร์ ใช้ทดสอบความแข็งผิวของวัสดุได้หลายชนิด เช่น อลูมินา (alumina-recrystallized) อมัลกัม ซีเมนต์ไลเนอร์ โลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม โลหะผสมทอง ยิปซัม (gypsum) โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม (Nickel-Chromium alloys) โลหะผสมแพลลาเดียม และพอร์ซเลน เป็นต้น *(57)*