



ชีวโลหะศาสตร์ และเทคโนโลยีการผลิต แบบเพิ่มเนื้อวัสดุสำหรับงานทันตกรรม

**Biometallic Science & Additive Manufacturing
Technology for Dental Applications**

วิวิธเทพ ศรีมณีพงศ์

ชีวโลหะศาสตร์ และเทคโนโลยี การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ สำหรับงานทันตกรรม

Biometallic Science & Additive Manufacturing Technology for Dental Applications

วิริทธิ์พล ศรีมนีพงษ์



ผู้เขียน : วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์
บรรณาธิการบริหาร : จารุวรรณ เวชตระกูล
บรรณาธิการ : พรเพ็ญ รัตนโพธิ์แสงศรี
กองบรรณาธิการ : ทีมงานคุณภาพสำนักพิมพ์วิช
พิสูจน์อักษร : ทีมงานคุณภาพสำนักพิมพ์วิช
ออกแบบปกและรูปเล่ม : ชญาบุญ บุญสิริวรรณ

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์.

ชีวโลหะศาสตร์ และเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุสำหรับงานทันตกรรม =
Biometallic Science & Additive Manufacturing Technology for Dental Applications.--
กรุงเทพฯ : วิช กรู๊ป (ไทยแลนด์), 2566.
308 หน้า.

1. ทันตวัสดุ. 2. ทันตกรรม I. ชื่อเรื่อง.

617.695

ISBN 978-616-8056-97-4

พิมพ์ครั้งที่ 1 มิถุนายน 2566 จำนวน 1,000 เล่ม
copyright © 2566 โดย วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์

จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย



สำนักพิมพ์วิช (ในเครือบริษัท วิช กรู๊ป (ไทยแลนด์) จำกัด)

421/48 แขวงบางขุนศรี เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ 10700

โทรศัพท์ 06 3362 8955, 0 2418 2885

Facebook: Wish Publishing website: www.wishbookmaker.com

ที่มารูปหน้าปกและปกใน : Designed using assets from Freepik.com

คำนำ

วิชาวัสดุศาสตร์สำหรับบางคนอาจจะรู้สึกว่ายากและเป็นเรื่องไกลตัว แต่ในความเป็นจริงแล้ว การเข้าใจในพื้นฐานทางด้านวัสดุศาสตร์ จะทำให้เราเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุ และสามารถเลือกใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น เจตนาของผู้เขียนจึงต้องการทำหนังสือเล่มนี้ให้เป็นคู่มือและเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจในวัสดุศาสตร์ โดยเฉพาะทางด้านโลหะศาสตร์ สามารถนำความรู้ไปใช้ในการรักษาผู้ป่วย นอกจากนี้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบเพิ่มเนื้อวัสดุ หรือที่เรียกกันอีกอย่างว่า เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D printing) ได้เข้ามามีบทบาทในทางการแพทย์และทันตกรรมมาเป็นเวลานาน แต่พบว่าตำราทางด้านนี้ที่เป็นภาษาไทยมีค่อนข้างน้อย ดังนั้น ผู้เขียนจึงมีความตั้งใจที่จะทำหนังสือเล่มนี้เพื่อเป็นข้อมูลความรู้พื้นฐานสำหรับผู้สนใจในเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ค้นคว้าหรือศึกษาเพื่อต่อยอด ผู้เขียนได้ใช้ความพยายามในการค้นคว้าหาข้อมูล รวมทั้งใช้องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิจัยด้วยตนเอง และผู้ร่วมวิจัยหลาย ๆ ท่านที่ผู้เขียนร่วมงานด้วย ตั้งแต่เรียนปริญญาเอกทางด้านโลหะศาสตร์ มาประกอบในการเขียนหนังสือเล่มนี้ เนื่องจากสำหรับหนังสือเล่มนี้เป็นหนังสือทางวิชาการ จึงมีคำเฉพาะที่เป็นคำศัพท์เทคนิคเฉพาะทางที่เป็นภาษาอังกฤษอยู่เป็นจำนวนมาก โดยที่คำศัพท์เฉพาะเหล่านี้จำนวนมากยังไม่เคยถูกแปลเป็นภาษาไทยจากสำนักงานราชบัณฑิตยสภา ณ เวลาที่ผู้เขียนเขียนหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนเขียนทับศัพท์เป็นภาษาไทยตามการอ่านออกเสียงจากความอนุเคราะห์จากสำนักงานราชบัณฑิตยสภาที่ช่วยสละเวลาแปลคำศัพท์เทคนิคที่ไม่เคยมีคำแปลภาษาไทยมาก่อน แต่ทั้งนี้ ผู้เขียนขออนุญาตใช้คำศัพท์ทางเทคนิคที่เป็นภาษาอังกฤษประกอบกับคำแปลภาษาไทยคำแรกที่ใช้ในแต่ละบทของหนังสือเล่มนี้ และรวมถึงมีการใช้คำศัพท์เทคนิคเฉพาะในบางคำเพื่อความเข้าใจในท้ายเล่มจะมีอภิธานศัพท์ (glossary) เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย

สุดท้ายนี้ หนังสือเล่มนี้จะไม่วันเกิดขึ้นได้ถ้าไม่มีบุคคลเหล่านี้ ขอบขอบคุณครวของ ผู้เขียนที่เป็นทุกอย่างของชีวิต ศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.ประสิทธิ์ ภาสันต์ อาจารย์ผู้ล่วงลับไปแล้วแต่ยังอยู่ในความทรงจำของผู้เขียนตลอด Professor Kim Kyo-Han, Kyungpook National University อาจารย์ผู้ล่วงลับไปแล้วและเป็นผู้ที่ชักนำผู้เขียนให้เข้ามาศึกษาทางด้าน แอนโธเซชัน Professor Takao Hanawa และ Professor Takayuki Yoneyama, Tokyo Medical and Dental University อาจารย์ที่ชี้แนะให้ความรู้ทางด้านโลหศาสตร์ในระหว่างที่ ศึกษา รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิงรพี โรจนกิจ และศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง กอบกาญจน์ ทองประสม ที่ให้ความเมตตากับผู้เขียนตั้งแต่เริ่มทำงานที่คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สุดท้าย ผู้เขียนอยากขอบคุณ Dr. Ievgen I. Fesenko, Kyiv Medical University ที่เอื้อเฟื้อรูปภาพประกอบในหนังสือเล่มนี้ และกำลังใจในการเขียนหนังสือเล่มนี้ แม้จะอยู่ในสถานการณ์ยูเครนที่โลกไม่มีวันลืม และผู้เขียนขอส่งกำลังใจแก่ทุกคนในยูเครน สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิโครงการตำรา คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าแนะนำแก้ไขเพื่อเป็นประโยชน์สูงสุดแก่ผู้อ่าน

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ไม่เพียงต่อทันตแพทย์ และผู้ที่สนใจ ในด้านโลหศาสตร์ หรือเทคโนโลยีการพิมพ์แบบเพิ่มเนื้อวัสดุ แต่ยังสามารถนำความรู้นี้ไปใช้ พัฒนางานทางด้านวัสดุศาสตร์ รวมถึงการวิจัยต่อยอด และนำไปสู่การแบ่งปันความรู้ต่อไปไม่สิ้นสุด แก่วงการการศึกษาและวิชาชีพทางด้านทันตกรรม

วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์

สารบัญ

บทที่ 1 วัสดุศาสตร์ และสมบัติทางวัสดุศาสตร์ (Materials Science and Properties)	2
---	---

วัสดุศาสตร์ (materials science).....	3
การแบ่งกลุ่มวัสดุ (classification of materials)	3
สมบัติทางวัสดุศาสตร์ (properties in material science)	11
สมบัติเชิงกายภาพ (physical properties)	12
สมบัติเชิงกายภาพด้านความร้อน (thermal properties).....	12
สมบัติเชิงกายภาพด้านแสง (optical properties)	15
สมบัติเชิงกายภาพด้านการไหล (rheological properties)	18
สมบัติทางเคมี (chemical properties)	19
สมบัติเชิงกล (mechanical properties)	29
มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity)	34
อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)	36
สภาพดึงยืดได้ (ductility) สภาพตีให้แผ่ได้ (malleability) และความเปราะ (brittleness)	39
ความยืดหยุ่น (resilience) และการทนความเค้น (toughness)	40
ความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength)	41
ความแข็ง (hardness).....	42
สมบัติเชิงชีวภาพ (biological properties)	46
สมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility)	46
สมบัติของโลหะที่สัมพันธ์กับสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (properties of metal related to biocompatibility)	47
การทดสอบสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility test)	49
การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ (how to prevent metals from corrosion)	52

บทที่ 2 โลหะวิทยาพื้นฐาน (Fundamental Metallurgy Science)

56

หลักการพื้นฐาน (fundamental concepts).....	57
กลไกการสร้างผลึก และการเกิดนิวคลีไอของโลหะ: (crystallization and nucleation of metal)	61
ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของเกรนโลหะ: (contributing factors to grain size of metal).....	62
อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิเยือกแข็งของโลหะ: (melting and freezing temperature of metal).....	63
การจำแนกประเภทของโลหะ: (classification of metal)	65
จำแนกประเภทโลหะทางโลหะวิทยา (metallurgical classification).....	65
โลหะเหล็กกลุ่มเหล็ก (ferrous alloys)	66
โลหะเหล็นอกกลุ่มเหล็ก (non-ferrous alloys).....	68
จำแนกประเภทโลหะตามระบบโครงสร้างวัฏภาค (equilibrium-phase diagram classification)	70
โลหะเจือระบบสารละลายของแข็ง (solid-solution alloy).....	71
โลหะเจือยูเทกติก (eutectic alloy).....	72
โลหะเจือเพอริเทกติก (peritectic alloy).....	72
จำแนกประเภทโลหะทางทันตกรรม (classifications of metals in dentistry).....	75
โลหะมีสกุล (noble metals).....	75
โลหะมีสกุลที่ใช้บ่อยในงานทางทันตกรรม (common noble metals used in dentistry)	76
โลหะพื้นฐาน (base metals)	77
โลหะพื้นฐานที่ใช้บ่อยในงานทันตกรรม (common base metals used in dentistry).....	77

บทที่ 3 โลหะเจือในทางทันตกรรม (Metal Alloys in Dentistry)

84

โลหะเจือมีสกุล (noble metal alloys)	86
โลหะเจือพื้นฐาน (base metal alloys)	90
โลหะเจือในงานโลหะเคลือบพอร์ซเลน (ceramo-metal alloys)	94
สมบัติที่สำคัญของโลหะเจือที่ใช้ในงานโลหะเคลือบพอร์ซเลน (properties of alloy for porcelain fused to metal restoration)	94
ประเภทโลหะเจือในงานโลหะเคลือบพอร์ซเลน (types of ceramo-metal alloys).....	96
กลไกการเชื่อมยึดระหว่างโลหะและพอร์ซเลน (mechanisms of metal-porcelain bonding)	99

โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และโลหะเจือกลุ่มโคบอลต์ (cobalt-based alloys).....	107
โลหะไทเทเนียม และโลหะเจือไทเทเนียม (titanium and titanium alloys).....	110
การผลิตโลหะไทเทเนียม (extraction of titanium).....	111
สมบัติเชิงกายภาพของโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์และโลหะเจือไทเทเนียม (physical properties of titanium and titanium alloys).....	112
ประเภทโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ และโลหะเจือไทเทเนียมที่ใช้ในงานทันตกรรม (commmercially pure titanium and titanium alloys used in dentistry)	116
โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ (cp Ti)	116
โลหะเจือไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม (Ti-6Al-4V alloy)	
และโลหะเจือไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-7ไนโอเบียม (Ti-6Al-7Nb alloy).....	118
โลหะเจือไทเทเนียม-เซอร์โคเนียม (Ti-Zr alloy).....	119
โลหะเจือนิกเกิล-ไทเทเนียม (Ni-Ti alloy).....	120
โลหะไทเทเนียมกับงานทางทันตกรรมประดิษฐ์ (titanium in prosthodontics)	124
งานฟันเทียมชนิดถอดได้ (removable prostheses).....	124
งานฟันเทียมชนิดติดแน่น (fixed prostheses)	126
ข้อจำกัดการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะไทเทเนียมด้วยวิธีการหล่อ (limitations of titanium casting process)	128
สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน และสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพของโลหะไทเทเนียม (corrosion resistance and biocompatibility of titanium)	130
ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการยึดติดระหว่างโลหะไทเทเนียมกับพอร์ซเลน (factors to the success of titanium-porcelain bonding).....	134

บทที่ 5 โลหะไทเทเนียมกับทันตกรรมรากเทียม (Titanium and Dental Implant)

142

ประเภทของรากเทียม (classification of dental implant)	144
การเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างกระดูก การชักนำเนื้อเยื่อกระดูก และการเกิดกระดูกเชื่อมประสาน (osteoinduction, osteoconduction and osseointegration).....	146
การปรับเปลี่ยนผิวรากเทียม (surface modification of dental implant)	151
วิธีการปรับเปลี่ยนผิวรากเทียม (techniques of implant surface modification).....	156
เทคนิคการฟ่นทรายและกัดด้วยกรด (grit-blasting and acid etching)	156
เทคนิคการลอกออกด้วยเลเซอร์ (laser ablation)	158
เทคนิคพลาสมาสเปย์ (plasma spray)	159
เทคนิคดีสคริต คริสตัลไลน์ เดโพสิชัน (discrete crystalline deposition).....	159
เทคนิคแอโนไดเซชัน (anodization/anodic oxidation).....	160
เทคนิคการเคลือบผิวด้วยสารชีวโมเลกุล (functionalized with biomolecules)	164
เทคนิคการเคลือบผิวด้วยสารกราฟีน/อนุพันธ์ของกราฟีน (immobilization with graphene/derivatives of graphene).....	165
กราฟีนกับงานทันตกรรมและรากเทียม (graphene for dental applications and dental implant).....	170

บทที่ 6 การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing)

182

โลหะผงวิทยา (powder metallurgy).....	185
กระบวนการผลิตผงโลหะ (metal powder manufacturing)	186
การทำให้เป็นละออง (atomization)	186
การทำการออกไซด์ รีดักชัน (oxide reduction)	188
การบดละเอียด (pulverization).....	189
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง (particle/powder size distribution).....	190
สมบัติความสามารถในการไหลของผงโลหะ (flowability of metal powder).....	193
กระบวนการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (additive manufacturing process)	196
การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยวิธีการฉีดวัสดุผ่านหัวฉีด (Material Extrusion Additive Manufacturing).....	202
สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดวัสดุผ่านหัวฉีด (mechanical properties of Material Extrusion AM part)	205

ข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดวัสดุผ่านหัวฉีด (possible defects of Material Extrusion AM part)	206
การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยวิธีเวทโฟโตพอลิเมอร์ไอเซชัน (Vat Photopolymerization Additive Manufacturing)	211
วัสดุและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยวิธีเวทโฟโตพอลิเมอร์ไอเซชัน (materials and mechanical properties of Vat Photopolymerization part)	213
การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยวิธีพาวเดอร์เบดฟิวชัน (Powder Bed Fusion Additive Manufacturing)	215
ซีเล็กทีฟเลเซอร์ซินเทอริง (Selective Laser Sintering)	217
มัลติ-เจ็ตฟิวชัน (Multi-Jet Fusion)	220
ซีเล็กทีฟเลเซอร์เมลติง/เลเซอร์พาวเดอร์เบดฟิวชัน (Selective Laser Melting/Laser Powder Bed Fusion)	222
ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพิมพ์แบบซีเล็กทีฟเลเซอร์เมลติง (Processing factors on Selective Laser Melting)	224
อิเล็กตรอนบีมเมลติง (Electron Beam Melting)	241
การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยวิธีมาทีเรียลเจ็ตติง (Material Jetting Additive Manufacturing)	244
การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยวิธีไบน์เดอร์เจ็ตติง (Binder Jetting Additive Manufacturing)	247
ข้อดีและข้อจำกัดของการพิมพ์ด้วยวิธีไบน์เดอร์เจ็ตติง (advantages and limitations of Binder Jetting AM)	252
วัสดุและคุณลักษณะของชิ้นงานที่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยวิธีไบน์เดอร์เจ็ตติง (materials and characteristics of Binder Jetting AM part)	253
การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยวิธีไดเรกต์เอนเนอร์จีดีโพสิชัน (Direct Energy Deposition Additive Manufacturing)	254
เลเซอร์เอ็นจิเนียเร็ดเน็ตเชปิง (Laser Engineered Net Shaping)	256
อิเล็กตรอนบีมแอดดิทีฟแมนูแฟกเจอริง (Electron Beam Additive Manufacturing)	257
โคลด์สเปรย์แอดดิทีฟแมนูแฟกเจอริง (Cold Spray Additive Manufacturing)	258
ข้อดีและข้อจำกัดของการพิมพ์ขึ้นรูปด้วยวิธีไดเรกต์เอนเนอร์จีดีโพสิชัน (advantages and limitations of Directed Energy Deposition AM)	260
การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยวิธีชีทลามิเนชัน (Sheet Lamination Additive Manufacturing)	260
ภาคผนวก	270
อภิธานศัพท์ (glossary)	273
ดัชนี ไทย	282
Index English	289

"Today a reader, tomorrow a leader"

- Margaret Fuller (1810-1850) -



วัสดุศาสตร์ และสมบัติทางวัสดุศาสตร์

(Materials Science and Properties)

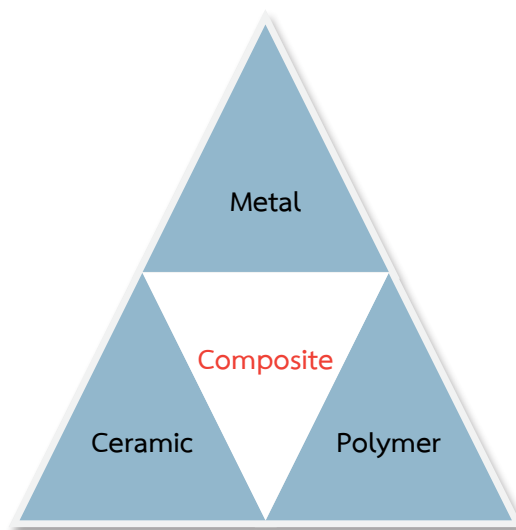


วัสดุศาสตร์ (materials science)

วัสดุศาสตร์เป็นศาสตร์ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) องค์ประกอบ (composition) การสังเคราะห์ (synthesis) หรือกระบวนการผลิตต่าง ๆ (processing) กับสมบัติของวัสดุ (properties of materials) โดยศึกษาทั้งสมบัติเชิงกล (mechanical properties) สมบัติเชิงกายภาพ (physical properties) สมบัติทางเคมี (chemical properties) และสมบัติเชิงชีวภาพ (biological properties) เนื่องจากไม่มีวัสดุชนิดใดที่สามารถนำไปใช้งานได้กับทุกกรณี การเข้าใจถึงสมบัติของวัสดุจะช่วยให้สามารถนำวัสดุไปใช้ได้เหมาะสมและประสบความสำเร็จกับงานแต่ละประเภท

การแบ่งกลุ่มวัสดุ (classification of materials)

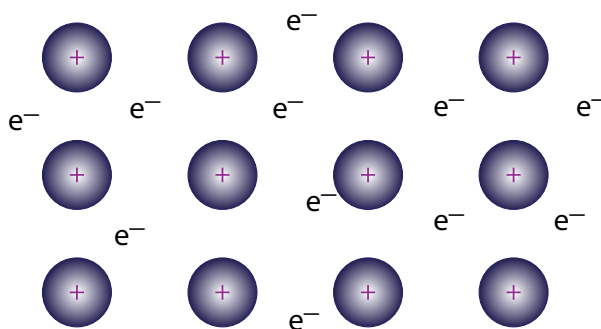
วัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวันและในร่างกายของมนุษย์แบ่งได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งประเภท ในที่นี้จะแบ่งประเภทวัสดุออกเป็นกลุ่มตามชนิด แต่ก็ยังสามารถแบ่งประเภทวัสดุตามโครงสร้างของวัสดุ โดยทั่วไป ในการแบ่งประเภทวัสดุตามชนิดจะแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 4 ประเภท ดังนี้



รูปที่ 1.1 ประเภทวัสดุแบ่งตามชนิด

โลหะ (metal/alloy)

โลหะจัดเป็นสารอนินทรีย์ (inorganic substances) ซึ่งแบ่งประเภทเป็น โลหะบริสุทธิ์ (metals) และโลหะเจือ (alloys) สำหรับโลหะเจือจะประกอบด้วยธาตุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และต้องมีธาตุโลหะอย่างน้อย 1 ชนิดเป็นองค์ประกอบ เช่น เหล็ก (iron) ทองแดง (copper) นิกเกิล (nickel) ทอง (gold) และอาจมีธาตุที่เป็นอโลหะ (non-metals) เช่น คาร์บอน (carbon) ออกซิเจน (oxygen) เป็นองค์ประกอบอยู่รวม โลหะเจือที่ใช้บ่อยในทางทันตกรรม เช่น โลหะเจือทอง (gold alloys) เหล็กกล้า (steel) โลหะโคบอลต์-โครเมียม (cobalt-chromium) สมบัติโดยทั่วไปที่สำคัญของวัสดุกลุ่มโลหะคือ มีความสามารถในการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และนำความร้อน (thermal conductivity) ได้ดี มีความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) และความสามารถในการขึ้นรูป (forming ability) สูง ลักษณะพื้นผิวเป็นมันวาวและสะท้อนแสง (luster and shining) โลหะมักนำมาใช้ในงานโครงสร้างหรืองานที่ต้องรับแรง ลักษณะโครงสร้างโลหะจะเป็นผลึกชัดเจน (crystalline structure) ซึ่งอะตอมจะมีการจัดตัวอย่างเป็นระเบียบและมีลักษณะเฉพาะ โดยยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะโลหะ (metallic bond) ที่อะตอมของโลหะมีการใช้เวเลนซ์อิเล็กตรอน (valence electron) ร่วมกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าตรงกันข้าม (รูปที่ 1.2) ด้วยเหตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันภายในโลหะจึงทำให้โลหะมีสมบัติดังกล่าวข้างต้น ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ง่ายและหลายทิศทาง และการที่โลหะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงเนื่องจากมีพันธะโลหะที่แข็งแรง โลหะส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็ง ยกเว้นธาตุปรอท (mercury) ซึ่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง และธาตุแกลเลียม (gallium) ที่เป็นของเหลว ที่อุณหภูมิประมาณ 30 °C



รูปที่ 1.2 พันธะโลหะ โดยมีอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) กระจายทั่วไป

โลหะเจือแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มสำคัญ คือ กลุ่มโลหะเจือที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก (ferrous alloys) โลหะกลุ่มนี้ประกอบด้วยเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักในเปอร์เซ็นต์สูง ซึ่งโลหะกลุ่มนี้จะพบได้มากและมีการนำไปใช้มากที่สุด เช่น โลหะเจือประเภทเหล็กกล้า (steel) และเหล็กหล่อ (cast iron) ที่ได้จากการเติมธาตุคาร์บอนลงไป นอกจากนี้ยังรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ที่ได้จากการเพิ่มธาตุโครเมียมเพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น โลหะเจืออีกกลุ่มคือโลหะเจือที่ไม่มีเหล็ก (non-ferrous alloys) หรือถ้ามีก็มีเป็นส่วนประกอบในปริมาณน้อย โดยเหล็กจะไม่ใช่เป็นองค์ประกอบหลัก ตัวอย่างของโลหะเจือกลุ่มนี้ได้แก่ โลหะที่ใช้ในทางทันตกรรมหรือทางการแพทย์ รวมไปถึงโลหะไทเทเนียม รายละเอียดจะกล่าวต่อไป

เซรามิก (ceramic)

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอนินทรีย์ ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะ (metallic elements) และธาตุที่เป็นอโลหะ (nonmetallic elements) ที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไอออน (ionic bond) หรือพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) วัสดุเหล่านี้ทั่วไปจะมีความเป็นฉนวนต่อการส่งผ่านไฟฟ้าและความร้อน ทนต่ออุณหภูมิได้ดีและทนต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้ดีกว่าโลหะหรือพอลิเมอร์ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งสูงแต่เปราะ และการทนความเค้นต่ำ (low toughness) วัสดุเซรามิกมีโครงสร้างเป็นได้ทั้งแบบมีรูปร่างเป็นผลึก และไม่มีรูปร่างเป็นผลึก หรืออสัณฐาน (non-crystalline/amorphous structure) หรืออาจมีทั้ง 2 โครงสร้างอยู่ร่วมกัน เซรามิกสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 2 ประเภทตามองค์ประกอบของซิลิกา คือ กลุ่มที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ (silica-based ceramic) และกลุ่มที่ไม่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ (non silica-based ceramic) หรือแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ 4 กลุ่ม ได้แก่

1. ซิลิเกตเซรามิก (silicate ceramics) เช่น พอร์ซเลน (porcelain)
2. ออกไซด์เซรามิก (oxide ceramics) เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide)
3. นอนออกไซด์เซรามิก (non-oxide ceramics) เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) ทังสเตนคาร์ไบด์ (tungsten carbide)
4. แก้วเซรามิก (glass-ceramics) เช่น ไดคอร์กลาสเซรามิก (Dicor glass ceramic)

อย่างไรก็ตาม รายละเอียดของวัสดุเซรามิกจะไม่กล่าวในที่นี้

พอลิเมอร์ (polymer)

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่อาจประกอบด้วยสารอินทรีย์ (organic substances) มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ หรือประกอบด้วยสารอนินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์จากธรรมชาติ วัสดุพอลิเมอร์มีลักษณะโมเลกุลที่เป็นโซ่ยาวหรือโครงข่าย โมเลกุลยึดอยู่กับกันส่วนใหญ่ด้วยพันธะโคเวเลนต์ หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) โครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไม่มีรูปร่างเป็นผลึก มีความหนาแน่นต่ำ คุณสมบัติทั่วไปจะเป็นฉนวนและต้านทานการนำความร้อนได้ดี (low thermal conductivity) มีความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะและมีสภาพดึงยืดสูง (high ductility) แต่ถ้าเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) แล้ว พอลิเมอร์บางประเภทอาจมีค่าอัตราส่วนสูงกว่าโลหะโดยเฉพาะเมื่อเป็นวัสดุผสม (polymeric composite materials) แต่มีวัสดุพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น กราฟีน (graphene) ซึ่งกราฟีนจัดเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่บางและแข็งแรงที่สุด นอกจากนี้พอลิเมอร์มักมีสมบัติต้านทานการทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้ดีกว่าโลหะ พอลิเมอร์นำมาใช้ในทางการแพทย์และทางทันตกรรมอย่างมาก โดยสามารถแบ่งวัสดุพอลิเมอร์ได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งประเภท

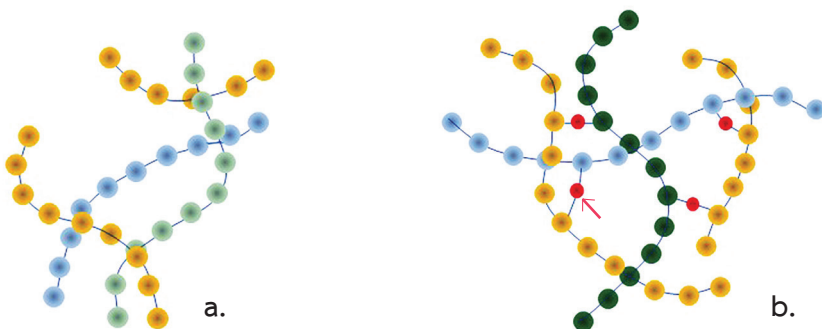
การแบ่งวัสดุพอลิเมอร์ตามสมบัติเชิงกายภาพด้านการตอบสนองต่อความร้อน (thermal behavior) จะแบ่งพอลิเมอร์ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (thermoplastic polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีส่วนโมเลกุลยาวที่ไม่ยึดต่อกันหนาแน่นมาก มีความสามารถในการยืดตัวและขึ้นรูปได้ง่าย สมบัติพอลิเมอร์กลุ่มนี้จะมีลักษณะอ่อนตัวลงเมื่อถูกความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature: T_g) และแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง สามารถเปลี่ยนแปลงหรือขึ้นรูปได้ใหม่ (reversible change) โดยที่สมบัติทางเคมีไม่เปลี่ยน และจะไม่เกิดกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีขณะได้รับความร้อนหรือเย็นตัวลง มีลักษณะสมบัติไม่แข็งมาก และยืดหยุ่นได้ง่าย เช่น วัสดุพิมพ์ปาก ชนิดคอมพาวด์ (dental impression compound) (รูปที่ 1.3)



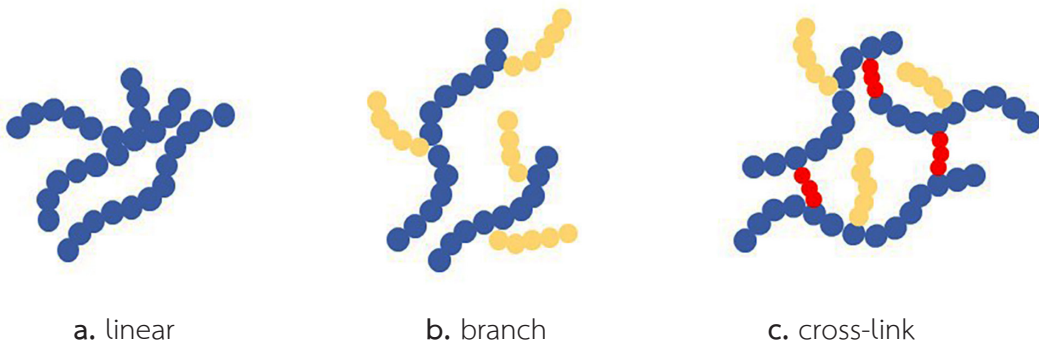
รูปที่ 1.3 วัสดุพิมพ์ปากชนิดคอมพาวด์ (dental impression compound) (บริษัท Kerr® ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2. เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (thermosetting polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง เพราะสายโซ่โมเลกุลเกาะยึดกันแน่นเป็นโครงข่าย หรือที่เรียกว่า เกิดการเชื่อมขวาง (cross-link) ทำให้พอลิเมอร์ประเภทนี้เมื่อขึ้นรูปแล้วจะแข็งตัวเมื่อเกิดกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reaction) และสร้างพันธะโควาเลนต์โดยไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก (irreversible change) ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่สมบูรณ์แล้ว ถึงแม้ว่าจะถูกความร้อนอีกครั้ง พอลิเมอร์ประเภทนี้มักมีสมบัติลักษณะแข็งและเปราะ เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate หรือ PMMA) อีพอกซี (epoxy) ดังรูปที่ 1.4 แสดงลักษณะโครงสร้างการยึดเกาะของโมเลกุลพอลิเมอร์



รูปที่ 1.4 ลักษณะโครงสร้างการยึดเกาะของโมเลกุล a. เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (thermoplastic polymer) และ b. เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (thermosetting polymer) ลูกศรในรูป b. แสดงพันธะเชื่อมขวาง (cross-link)

การแบ่งพอลิเมอร์ตามประเภทตามลักษณะของโครงสร้าง (chain structure) จะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ **พอลิเมอร์เชิงเส้น (linear polymers)** ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (monomer) ชนิดเดียวกันหรือต่างกันที่มาต่อกันเป็นโซ่ยาว **พอลิเมอร์โซ่กิ่ง (branched polymers)** เกิดจากมอนอเมอร์เส้นหนึ่งต่อกับมอนอเมอร์อีกเส้นหนึ่งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดต่อเป็นแขนงออกมา และ**พอลิเมอร์เชื่อมขวาง (cross-linked polymers)** เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของโซ่มอนอเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันเป็นร่างแห (รูปที่ 1.5) ลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของพอลิเมอร์นั้น ๆ โดยเฉพาะความแข็งแรงหรืออุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่มักเพิ่มขึ้นเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ยาวและเชื่อมต่อกันมากขึ้น รวมทั้งทำให้น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.5 ลักษณะการยึดเกาะของโซ่มอเลกุลพอลิเมอร์ a. พอลิเมอร์เชิงเส้น b. พอลิเมอร์โซ่กิ่ง และ c. พอลิเมอร์เชื่อมขวาง

วัสดุผสม (composite materials)

เป็นวัสดุผสมที่ได้จากวัสดุ 2 ชนิด หรือมากกว่า 2 ชนิดมาผสมกัน เช่น ไฟเบอร์กลาสส์ (fiberglass) ซึ่งได้มาจากการนำเส้นใยแก้วที่มีความแข็งแรงสูงฝังลงในวัสดุพอลิเมอร์ ทำให้ได้ทั้งคุณสมบัติความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าวัสดุบางประเภทที่มีความแข็งแรงต่ำ แต่เมื่อนำมาเป็นวัสดุผสมก็จะเพิ่มความแข็งแรง เช่น อีพอกซี ที่นำคาร์บอนมาผสมจนเกิดเป็น วัสดุผสมคาร์บอน-อีพอกซี (carbon-epoxy composite) ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไม่เพียงเท่านั้น วัสดุผสมหลายชนิดมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักสูงกว่าวัสดุโลหะ รายละเอียดจะกล่าวต่อไปในหัวข้อสมบัติเชิงกลชนิดความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength)

นอกจากการจำแนกวัสดุตามที่กล่าวข้างต้นแล้ว ในทางวัสดุศาสตร์อาจแบ่งกลุ่มวัสดุตามลักษณะโครงสร้างของผลึก หรือแบ่งกลุ่มวัสดุตามการแสดงสมบัติตามทิศทางของโครงสร้างผลึก (crystallographic directions)

การแบ่งกลุ่มวัสดุตามโครงสร้างของผลึกของวัสดุแบ่งเป็น

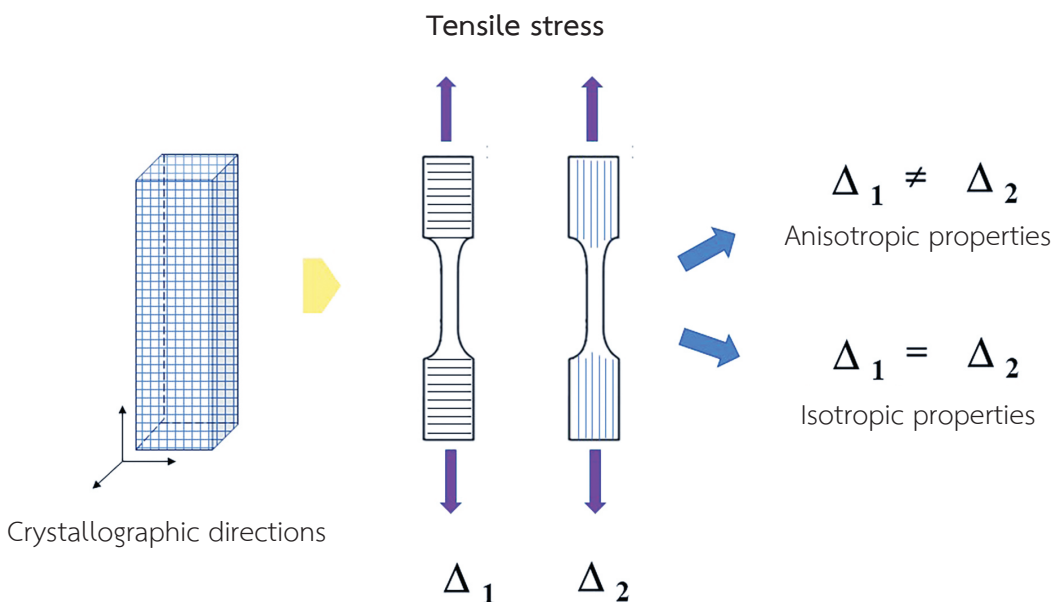
1. วัสดุประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (crystalline materials) พบในวัสดุประเภทโลหะที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึกอย่างเป็นระเบียบสมบูรณ์ อาจจะเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกเดี่ยว (single crystalline structure) ซึ่งพบในโลหะบริสุทธิ์ หรือมีหลายโครงสร้างผลึก (polycrystalline structure) ซึ่งพบในโลหะเจือ วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะประกอบด้วยผลึกที่เรียกว่า เกรน (grain) การเรียงตัวของผลึกจึงแตกต่างกันในแต่ละเกรน โดยรอยต่อของแต่ละเกรน อะตอมจะเรียงตัวต่อเนื่องกัน บริเวณนี้จะเรียกว่า ขอบเกรน (grain boundary) โดยรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

2. วัสดุประเภทที่มีโครงสร้างไม่เป็นผลึก (non-crystalline materials) เป็นวัสดุที่มีการเรียงตัวของอะตอมที่ไม่สมมาตร หรือการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้น จึงอาจเรียกโครงสร้างประเภทนี้ว่า “อสัณฐาน” จะพบในวัสดุประเภทเซรามิกหรือพอลิเมอร์ ถึงแม้ว่าวัสดุทั้ง 2 ประเภทนี้อาจมีส่วนประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึกประกอบอยู่ด้วย

การแบ่งกลุ่มวัสดุตามการแสดงสมบัติตามทิศทางของโครงสร้างผลึก (รูปที่ 1.6) แบ่งเป็น

1. **วัสดุแอนไอโซทรอปิก (anisotropic materials)** คือ วัสดุที่แสดงสมบัติทั้งเชิงกลและกายภาพที่ต่างกันเมื่อวัสดุนั้นมีทิศทางการเรียงตัวของโครงสร้างที่ต่างกัน กล่าวคือ การแสดงออกพฤติกรรมของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุล วัสดุแอนไอโซทรอปิกจึงเป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นไปตามทิศทางของโครงสร้างผลึก (direction dependence)

2. **วัสดุไอโซทรอปิก (isotropic materials)** คือ วัสดุที่ไม่ว่าจะมีการเรียงตัวของโครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุลในทิศทางที่ต่างกัน แต่ยังคงแสดงสมบัติเชิงกลหรือกายภาพเหมือนเดิม แสดงว่าทิศทางของโครงสร้างของวัสดุนั้นไม่มีผลต่อสมบัติตัวมันเอง วัสดุไอโซทรอปิกจึงเป็นวัสดุประเภทที่สมบัติไม่เป็นไปตามทิศทางของโครงสร้างผลึก (direction independence)



รูปที่ 1.6 วัสดุทดสอบรูปดัมเบล (dumbbell shape) 2 ชิ้น ที่มีการเรียงตัวของโครงสร้างต่างกัน (1) มีโครงสร้างแนวขวาง และ (2) มีโครงสร้างแนวตั้ง ภายหลังจากทั้ง 2 ชิ้นได้รับแรงเค้นดึง (tensile stress) พบว่า ถ้าเป็นวัสดุแอนไอโซทรอปิก (anisotropic materials) จะให้ค่าสมบัติทางวัสดุศาสตร์ที่ต่างกันระหว่างชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 2 ($\Delta_1 \neq \Delta_2$) ถ้าเป็นวัสดุไอโซทรอปิก (isotropic materials) จะให้ค่าสมบัติทางวัสดุศาสตร์ที่เหมือนกันระหว่างชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 2 ($\Delta_1 = \Delta_2$)

สมบัติทางวัสดุศาสตร์ (properties in material science)

เมื่อนำวัสดุมาใช้งานไม่ว่าจะใช้ในชีวิตประจำวันหรือใช้ในร่างกายมนุษย์จะต้องได้รับแรงเค้น (stress) มากกระทำ รวมไปถึงเมื่อวัสดุต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ทั้งอุณหภูมิหรือความเป็นกรด-ด่าง ที่เปลี่ยนไป ดังนั้น การเข้าใจถึงสมบัติของวัสดุจึงจำเป็นเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานแต่ละประเภท สมบัติทางวัสดุศาสตร์แบ่งได้ดังนี้

สมบัติเชิงกายภาพ (physical properties) เป็นสมบัติของวัสดุที่กำหนดขึ้นโดยไม่มีแรงภายนอกมาเกี่ยวข้อง สามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอก และมักเกี่ยวกับวิธีการทางฟิสิกส์ เช่น ความหนืด (viscosity) การขยายตัวจากความร้อน (thermal expansion) ความสามารถในการเปียก (wettability) จุดเดือด-จุดหลอมเหลว (boiling and melting point) รวมไปถึงสมบัติด้านแสงและสี (optical property and color) ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพ (physical change) จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่เกี่ยวกับสมบัติเชิงกายภาพโดยไม่มีผลต่อองค์ประกอบภายในหรือเกิดเป็นวัสดุใหม่

สมบัติทางเคมี (chemical properties) เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ เช่น การกัดกร่อน (corrosion) ความเป็นกรด-ด่างของสาร (pH value) บางตำราอาจนำสมบัติทางเคมีรวมกับสมบัติเชิงกายภาพ

สมบัติเชิงกล (mechanical properties) เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงลักษณะและผลที่เกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ รวมถึงความสามารถของวัสดุที่จะรับหรือทนแรง หรือความเค้นได้เพียงใด รวมไปถึงศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อวัสดุ เช่น ความแข็ง (hardness) ความแข็งแรง (strength) การทนความเค้น (toughness)

สมบัติเชิงชีวภาพ (biological properties) เป็นสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของเซลล์หรือเนื้อเยื่อร่างกายต่อวัสดุนั้น ๆ เช่น ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) การก่อให้เกิดการอักเสบ (inflammatory response) หรือการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity)

สมบัติเชิงกายภาพ (physical properties)

1. สมบัติเชิงกายภาพด้านความร้อน (thermal properties)

สมบัติด้านความร้อนเป็นสมบัติเชิงกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางทันตวัสดุศาสตร์ โดยทั่วไป โลหะไม่เพียงแต่นำกระแสไฟฟ้าได้ดีแต่ยังเป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดีกว่าวัสดุเซรามิกหรือพอลิเมอร์ ซึ่งสมบัติด้านความร้อนของโลหะมีทั้งข้อดีและข้อเสียขึ้นอยู่กับประเภทการนำไปใช้งาน เช่น ในงานบูรณะฟัน สมบัติด้านความร้อนของวัสดุจะมีความสำคัญโดยเฉพาะหากนำวัสดุมาบูรณะใกล้ประสาทฟัน สมบัติเชิงกายภาพด้านความร้อน ได้แก่

1.1 ความร้อนแฝงของการหลอม (latent heat of fusion) หมายถึง ความร้อนแฝงที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งเป็นของเหลวต่อ 1 กรัม มีหน่วยเป็นแคลอรี (calorie) ต่อกรัม หรือจูล (joule) ต่อกรัม ดังนั้น ความร้อนแฝงของการหลอมจึงมีความหมายใกล้เคียงกับการหลอมเหลว (melting) อาจพบว่ามีการใช้ความหมายที่เหมือนกันระหว่าง อุณหภูมิการหลอมหรือการรวมตัว (fusion temperature) กับอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature) และอุณหภูมิของเหลว (liquidus temperature)

1.2 สมบัติการนำความร้อน (thermal conductivity, k) เป็นความสามารถเชิงกายภาพด้านความร้อนของวัสดุในการถ่ายเทความร้อน ณ สภาวะที่คงที่ โดยวัด “ปริมาณความร้อน” เป็นแคลอรีที่ผ่านวัสดุหนา 1 เซนติเมตร ต่อหน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร ต่อ 1 วินาที ดังนั้น อุณหภูมิขณะวัดจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สมบัติการนำความร้อนมักใช้หน่วยเป็น W/m.K (Watts per meter-Kelvin) วัสดุโลหะจะนำความร้อนได้ดีที่สุด ตามด้วยเซรามิกและพอลิเมอร์ตามลำดับ สมบัติการนำความร้อนของวัสดุมีความสำคัญมากต่อการเลือกวัสดุไปใช้บูรณะหรือทดแทนฟันให้แก่ผู้ป่วยในทางทันตกรรม เช่นในการบูรณะฟันที่ใกล้ประสาทฟัน หากใช้วัสดุที่นำความร้อนได้ดีอาจช่วยในการปกป้องประสาทฟัน หรือการเลือกใช้วัสดุที่นำความร้อนได้ดีมาเป็นฐานฟันเทียมอาจจะเป็นผลดีต่อผู้ป่วยที่จะสามารถรับรู้ขณะรับประทานอาหารหรือดื่มเครื่องดื่มร้อนหรือเย็นได้ไวดังนั้น สมบัติการนำความร้อนของวัสดุที่ดีจะมีประโยชน์หรือไม่ ขึ้นอยู่กับการเลือกวัสดุนั้นไปใช้งานแต่ละประเภท

1.3 สมบัติการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity, h) เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึง “อัตราเร็ว” ของการแพร่ผ่านของพลังงานความร้อน ขณะที่วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน คำนวณได้จากอัตราส่วนค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, k) ต่อความหนาแน่นของวัตถุ (density) และความจุความร้อน (heat capacity, C_p) มีหน่วยเป็นพื้นที่ต่อเวลา เช่น m^2/s หรือ cm^2/s ดังสมการข้างใต้ วัสดุที่มีค่าความจุความร้อน (heat capacity) ต่ำ และมีการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง วัสดุนั้นจะมีค่าสมบัติการแพร่ความร้อนที่สูง

$$h \text{ (thermal diffusivity)} = \frac{k \text{ (thermal conductivity)}}{C_p \text{ (heat capacity)} \times \text{density}}$$

ดังนั้น วัสดุที่มีค่าการแพร่ความร้อนสูงย่อมมีแนวโน้มที่จะมีสมบัตินำความร้อนได้ดี (good heat **conducting**) ขณะที่วัสดุที่มีค่าการแพร่ความร้อนต่ำย่อมมีแนวโน้มที่จะมีสมบัตินำความร้อนได้ต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี (good heat **insulating**) สมบัติการแพร่ความร้อนจึงสัมพันธ์กับสมบัติการนำความร้อนของวัสดุอย่างใกล้ชิด จะเห็นได้ว่าสภาวะภายในช่องปาก อุณหภูมิมักไม่คงที่ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอาหารหรือเครื่องดื่มที่บริโภค ดังนั้น สมบัติการแพร่ความร้อนจึงมีความสำคัญ โดยวัสดุที่มีค่าการแพร่ความร้อนสูง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากปัจจัยภายนอก วัสดุเหล่านี้จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว ในงานทางทันตกรรมบูรณะฟันบางประเภทต้องการให้มีค่าการแพร่ความร้อนที่แตกต่างกันเพื่อให้เหมาะกับการรักษาหรือการใช้งานดังที่กล่าวข้างต้น ในตารางที่ 1.1 แสดงสมบัติการนำความร้อน และสมบัติการแพร่ความร้อนของวัสดุบางชนิด

1.4 สมบัติการขยายตัวเหตุความร้อน (thermal expansion) หมายถึง วัสดุมีการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น $^{\circ}K$ และหดตัวเมื่อเย็นลง ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อน (coefficient of thermal expansion) จึงเป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงขนาดการขยายตัวเชิงเส้นวัสดุ ณ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น หน่วยที่ได้คือ ppm (parts per million) / $^{\circ}K$ ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเหตุความร้อนของทันตวัสดุบางชนิด แสดงในตารางที่ 1.2

จากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของวัสดุเมื่อเทียบกับเคลือบฟัน (enamel) ($\alpha_{\text{material}} / \alpha_{\text{tooth enamel}}$) แสดงให้เห็นว่า วัสดุส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนมิติ (dimensional change) มากกว่าเคลือบฟันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งเหตุการณ์เช่นนี้จะเกิดได้เสมอ เพราะอุณหภูมิในช่องปากมีการเปลี่ยนแปลงตลอด และจะมีผลต่อความสำเร็จหรือความล้มเหลวในการรักษา ถ้าวัสดุบูรณะฟันขยายตัวและหดตัวมากกว่าเนื้อฟันหรือเคลือบฟันจะก่อให้เกิดการรั่วของรอยต่อระหว่างวัสดุบูรณะกับเนื้อฟัน (marginal leakage) นอกจากนี้ความแตกต่างของสมบัติการขยายตัวเหตุความร้อนระหว่างวัสดุยังมีผลต่อความสำเร็จในการสร้างชิ้นงานทางทันตกรรมประเภทโลหะที่เคลือบด้วยพอร์ซเลน (porcelain fused to metal restoration) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 1.1 แสดงความหนาแน่น สมบัติเชิงกายภาพด้านความร้อน ของน้ำ ผิวเคลือบฟัน เนื้อฟัน และวัสดุทางทันตกรรมบางชนิด (density and thermal properties of water, enamel, dentin, and dental materials) (reproduced with permission from Elsevier) ³

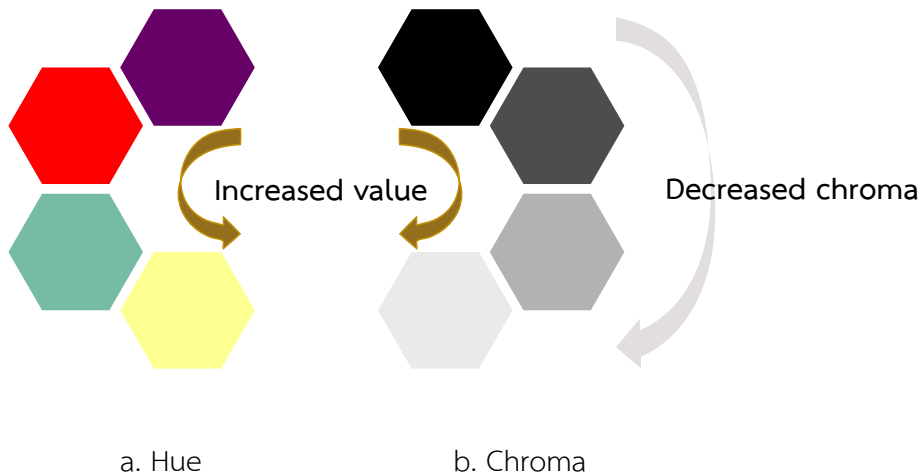
Materials	Density (g.cm ⁻³)	Specific Heat (cal.g ⁻¹ .K ⁻¹)	Thermal Conductivity (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Thermal Diffusivity (cm ² .s ⁻¹)
Water	1.00	1.00	0.44	0.0014
Dentin	2.14	0.30	0.57	0.0018-0.0026
Glass ionomer	2.13	0.27	0.51-0.72	0.0022
Zinc phosphate	2.59	0.12	1.05	0.0030
Composite	1.6-2.4	0.20	1.09-1.37	0.0019-0.0073
Enamel	2.97	0.18	0.93	0.0047
Amalgam	11.6	0.005	22.6	0.96
Pure gold	19.3	0.03	297	1.18

ตารางที่ 1.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของวัสดุทางทันตกรรม และเมื่อเทียบกับฟัน (coefficient of thermal expansion (α) of dental materials compared with those of tooth enamel and dentin) (reproduced with permission from Elsevier)³

Materials	α (ppm K ⁻¹)	$\alpha_{\text{material}} / \alpha_{\text{tooth enamel}}$
Aluminous porcelain	6.6	0.58
Dentin	8.3	0.75
Commercially pure titanium	8.5	0.77
Type II glass ionomer	11.0	0.96
Tooth enamel	11.4	1.00
Gold-palladium alloy	13.5	1.18
Gold (pure)	14.0	1.23
Palladium-silver alloy	14.8	1.30
Amalgam	25.0	2.19
Composite	14-50	1.2-4.4
Denture resin	81.0	7.11
Pit and fissure sealant	85.0	7.46
Inlay wax	400.0	35.1

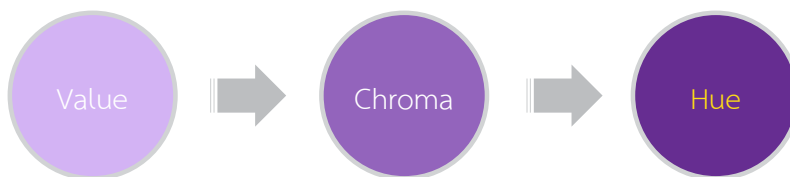
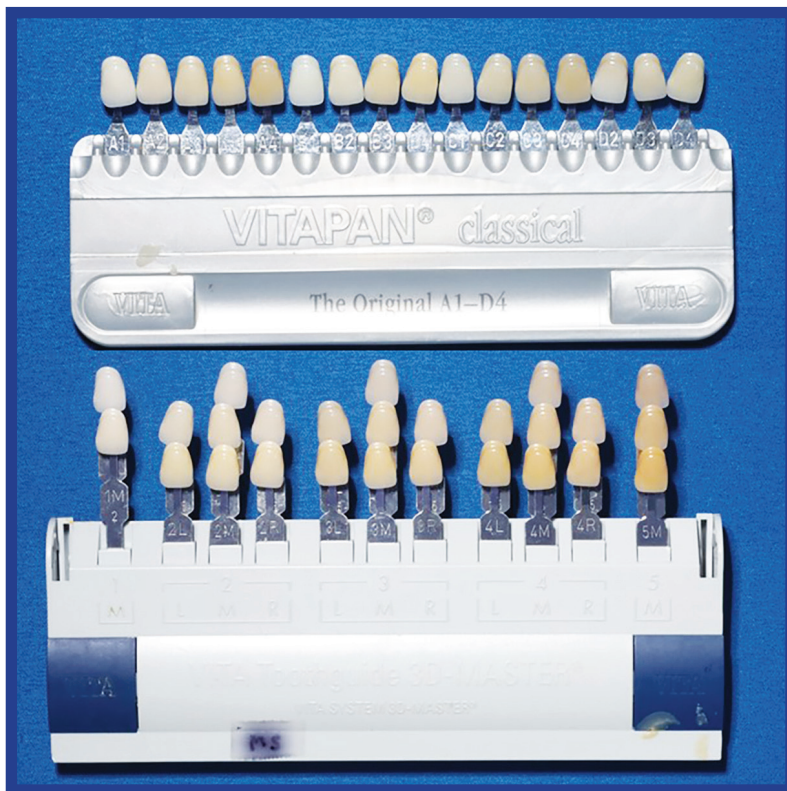
2. สมบัติเชิงกายภาพด้านแสง (optical properties)

2.1 สี (color) สมบัติด้านสีจะประกอบด้วยแม่สี หรือเนื้อสี (hue) ได้แก่ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ส่วนความหนัก-เบาของสี (value) จะเป็นการสังเกตที่ความมืด (darkness) หรือความสว่าง (lightness) ของสีนั้น ๆ หรือว่าจะสังเกตจากความหนักเบา (value of color) ของสีที่ใกล้กับสีดำหรือสีขาว (gray scale) ในขณะที่ความเข้มสี (chroma) คือการสังเกตระดับความเข้มของเนื้อสีในสีเดียวกัน (degree of saturation of particular hue) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 ตัวอย่างการเทียบระหว่าง “สี” “ความมืด-ความสว่างของสี” และ “ความเข้มสี” โดย “สี” ที่แตกต่างในแถว a. สามารถเทียบว่ามีค่า “ความสว่าง” เพิ่มขึ้นจากบนลงล่าง ซึ่งจะเหมือนกับ “ความเข้มของสี” ในแถว b. ที่มีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มสีลดน้อยลงจากบนลงล่าง

ในทางทันตกรรม สมบัติทางสีมีความสำคัญมาก เพราะทันตแพทย์ต้องเลือกสีวัสดุที่ใช้ในการบูรณะให้ใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติของผู้ป่วย อุปกรณ์ที่ช่วยในการเลือกหรือเทียบสีฟัน (shade guide) ที่เป็นที่ยอมรับจะเป็นของบริษัท VITA North America ซึ่งมี 2 แบบ คือ แบบคลาสสิก (classical shade guide) และแบบ 3D มาสเตอร์ (3D-Master shade guide) (รูปที่ 1.8) โดยวิธีการใช้ VITA shade guide 3D-Master ทันตแพทย์จะต้องเลือกจากความหนักเบา หรือความมืด-ความสว่างของสีระหว่าง 1 ถึง 5 ตามด้วยการเทียบความเข้มสีจากอุปกรณ์เทียบสีฟันในแนวตั้ง และเลือกสีจากอุปกรณ์เทียบสีฟันในแนวขวางว่าเป็น L (yellowish) M (middle hue) หรือ R (reddish)



รูปที่ 1.8 อุปกรณ์เทียบสีฟัน VITA (VITA North America) 2 แบบ (บน) แบบคลาสสิก (classical shade guide) และ (ล่าง) 3D มาสเตอร์ (3D-Master shade guide) และลำดับขั้นตอนการเทียบสีฟันเมื่อใช้ 3D-Master shade guide

2.2 สภาพทึบแสง (opacity) ความโปร่งแสง (translucency) และความโปร่งใส (transparency) สมบัติด้านแสงเหล่านี้จะมีผลต่อความสวยงามเป็นธรรมชาติของวัสดุบูรณะเมื่อนำมาใช้ในผู้ป่วย วัสดุที่มีความโปร่งแสง (translucency materials) ในทางทันตกรรมได้แก่ เรซินคอมโพสิต (resin composite) อะคริลิก (acrylic) ส่วนวัสดุที่โปร่งใสจะเป็นวัสดุจำพวกแก้ว (glass) อย่างไรก็ตาม สมบัติทางด้านแสงเหล่านี้มักไม่เกี่ยวข้องกับวัสดุโลหะ ดังนั้น รายละเอียดของสมบัติด้านแสงเหล่านี้จึงไม่กล่าวถึง

3. สมบัติเชิงกายภาพด้านการไหล (rheological properties)

เป็นการศึกษาสมบัติด้านการไหลของวัสดุเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) โดยเกิดการไหลเคลื่อนไม่ว่าจะในสถานะของเหลวหรือของแข็ง สมบัติด้านการไหล ได้แก่

3.1 ความหนืด (viscosity) เป็นสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงการต้านทานการไหล (resistance to flow) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ถ้าอยู่ในสถานะของเหลวจะสามารถวัดการต้านทานการไหล แต่สำหรับของแข็งจะวัดสมบัติด้านการไหลจากการวัดการคืบตัว (creep) หรือสมบัติหยุ่นหนืด (viscoelasticity) ของวัสดุ ในทางทันตวัสดุศาสตร์ สมบัติความหนืดของวัสดุมีความสำคัญต่อการนำวัสดุมาใช้งาน เช่น วัสดุพิมพ์ปาก หรือซีเมนต์ โดยวัสดุเหล่านี้ทั้งขณะใช้งานและขณะเตรียมจะอยู่ในสถานะของเหลวก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวเป็นของแข็ง ดังนั้น ความหนืดของวัสดุจะมีผลต่อการทำงานของทันตแพทย์หรือผู้ช่วยทันตแพทย์ในการเตรียมหรือใช้วัสดุนั้น ๆ ส่วนวัสดุโลหะความหนืดจะมีความสำคัญ เช่น ขณะนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อ (casting) โลหะหลอมเหลวที่มีความหนืดน้อยจะมีความสามารถในการไหลแผ่เข้าไปในแบบหล่อพิมพ์ (casting mold) ได้ง่ายกว่าโลหะหลอมเหลวที่มีความหนืดมาก ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติความสามารถในการหล่อ (castability) ของโลหะนั้น ๆ

3.2 การคืบตัวและการไหล (creep/flow) ในทางวัสดุศาสตร์ มักจะใช้คำว่า “flow” สำหรับวัสดุประเภทที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous materials) เช่น วัสดุพอลิเมอร์ สมบัติที่สำคัญของวัสดุที่มีความหนืดยืดหยุ่น (viscoelastic material) คือ การคืบตัว ซึ่งหมายถึงการเพิ่มความเครียด (strain) ภายในวัสดุขณะมีแรงเค้น หรือความเค้น มากระทำที่คงที่ และการลดลงของแรงเค้น (stress relaxation) ภายในวัสดุภายหลังเกิดความเครียด (strain) ที่คงที่ ดังนั้น การคืบตัวจึงหมายถึงการที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (plastic strain) ภายใต้แรงกระทำที่คงที่สม่ำเสมอ (static load) หรือความเค้นที่คงที่ (constant stress) ซึ่งอาจ

มาจากอุณหภูมิก็ได้ เช่น ผลจากอุณหภูมิที่สูงแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุนั้น ๆ (increased temperature) และยังขึ้นอยู่กับเวลาที่ผ่านไป โดยปกติ โลหะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง การเกิดการคืบตัวของวัสดุโลหะภายในช่องปากเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมักจะไม่เกิด ยกเว้นวัสดุบูรณะฟันประเภทอะมัลกัม (amalgam) การคืบตัวอาจเกิดเมื่อได้รับแรงบดเคี้ยวอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอะมัลกัมประเภทที่มีปริมาณทองแดงต่ำ (low copper amalgam) จะมีความต้านทานการคืบตัวต่ำ (low creep resistance) อาจนำไปสู่ความล้มเหลวในการรักษา สมบัติการคืบตัวยังเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางวัสดุศาสตร์ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ โดยเฉพาะการบูรณะฟันด้วยสะพานฟันที่เคลือบพอร์ซเลนบนโลหะ เพราะเมื่อโลหะถูกความร้อนที่สูงจนใกล้อุณหภูมิสูงสุดที่โลหะนั้น ๆ ที่ยังสามารถคงสภาพเป็นของแข็ง (solidus temperature) ขณะเผาเคลือบพอร์ซเลนบนโลหะ สิ่งที่จะเกิดขึ้นคือ โลหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวรหรือที่เรียกว่า “เกิดการคืบตัวภายใต้น้ำหนักตัวเอง” ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “sag deformation” ดังนั้น sag deformation จึงเป็นประเภทหนึ่งของการเกิดการคืบตัวของโลหะที่มักพบในงานประเภทโลหะเคลือบพอร์ซเลน ดังนั้น การเลือกโลหะที่ใช้กับพอร์ซเลนจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกโลหะที่มีสมบัติอุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสมและสูงเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดการคืบตัว (creep/sag deformation) ของโลหะนั้น ๆ ณ อุณหภูมิที่สูง

สมบัติทางเคมี (chemical properties)

หนึ่งในข้อด้อยของวัสดุประเภทโลหะเมื่อเทียบกับเซรามิกหรือพอลิเมอร์ คือ โลหะสามารถเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้เมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่เอื้ออำนวย โดยเฉพาะภายในช่องปากที่สภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และนำไปสู่ความเสียหายกับชิ้นงาน ดังนั้น การเข้าใจสมบัติทางเคมีของวัสดุจึงจำเป็นเพื่อช่วยลดการเกิดผลเสียภายหลัง

1. การหมอง (tarnish) เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีของผิวโลหะกับสิ่งแวดล้อม จนเกิดการตกตะกอน (deposit) ไม่ว่าจะเป็นของซัลไฟด์ (sulfide) ออกไซด์ (oxide) หรือคลอไรด์ (chloride) บนผิวโลหะ สังเกตได้จากสีของพื้นผิวโลหะเปลี่ยนไป หรือความมันวาวลดลง ความหมองไม่ได้เป็นสาเหตุที่ทำให้วัสดุเสื่อมไป เพียงแต่จะทำให้ขาดความสวยงามซึ่งอาจแก้ไขด้วยการขัด อย่างไรก็ตาม ชั้นออกไซด์หรือคลอไรด์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดความหมองของผิวโลหะถ้าเกิดขึ้นนาน ๆ อาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่อจนนำไปสู่การเกิดกระบวนการกัดกร่อน จนเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ