

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ การบูรณะฟันด้วยครอบฟันหรือสะพานฟันโดยใช้โลหะร่วมกับพอร์ซเลนเป็นที่นิยมใช้กันมานานจนปัจจุบัน และในระยะหลังมีการพัฒนาการบูรณะโดยใช้วัสดุเซรามิกล้วนมากขึ้น สามารถใช้ทำครอบฟันหรือสะพานฟันได้แต่สามารถใช้ได้เพียงบางกรณี ดังนั้นการใช้โลหะร่วมกับพอร์ซเลนยังได้รับความนิยมและมีความจำเป็นต้องใช้ต่อไปในอนาคต โลหะไทเทเนียมเป็นวัสดุทางเลือกตัวหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมากขึ้นในทางทันตกรรมเนื่องจากสมบัติที่ดีหลายประการ จึงมีความพยายามที่จะนำมาใช้แทนโลหะทองผสมที่มีราคาแพงหรือโลหะผสมพื้นฐาน (base metal alloy) ที่มีนิกเกิลซึ่งอาจทำให้เกิดการแพ้ในบางคน เมื่อนำไทเทเนียมมาใช้ทำครอบฟันหรือสะพานฟันโลหะเคลือบพอร์ซเลน พบปัญหาว่า การยึดติดกับพอร์ซเลนยังไม่ดีพอ และในการวัดการยึดติดระหว่างวัสดุสองชนิดส่วนใหญ่ใช้การวัดค่าความทนแรงยึด (bond strength) เป็นวิธีการวัดค่าความเค้นขณะที่วัสดุแตกออกจากกัน ซึ่งมีการศึกษาที่ได้บ่งชี้ไว้ว่าเป็นวิธีการที่อาจได้ค่าที่ไม่เที่ยงตรงมากนัก ปัจจุบันมีวิธีการวัดค่าการยึดติดเป็นค่า strain energy release rate (G value) แทนการวัดค่าความทนแรงยึดแบบเดิม

การทบทวนวรรณกรรมนี้จะกล่าวถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้

1. โลหะไทเทเนียม
2. พอร์ซเลนทันตกรรม
3. การยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลนและระหว่างไทเทเนียมกับพอร์ซเลน
4. การวัดค่าการยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลน

1. โลหะไทเทเนียม

1.1 ไทเทเนียมบริสุทธิ์ (commercially pure titanium, CP Ti)

ไทเทเนียม (Ti) เป็นธาตุโลหะที่มีมากเป็นอันดับที่ 4 รองจากอลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแมกนีเซียม (Mg) (Parr, Gardner, & Toth, 1985) ไทเทเนียมเป็นธาตุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาจึงไม่พบไทเทเนียมในรูปแบบธาตุบริสุทธิ์ในธรรมชาติ แต่พบในรูปของสินแร่ไทเทเนียม (Ti-ores) ได้แก่ รูไทล์ (rutile : TiO_2) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เสถียรที่สุดของไทเทเนียม หรืออิลเมนไนท์ (ilmenite : FeTiO_3) (Lautenschlager & Monaghan, 1993) คอกเตอร์วิลเฮล์ม โครล (Dr. Wilhelm J.

Kroll) เป็นผู้คิดค้นวิธีผลิตโลหะไทเทเนียมมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้สำเร็จ โดยการเผาไหม้แร่ไทเทเนียมได้แก่รูไทล์หรืออิลเมนไนท์กับธาตุคาร์บอนและคลอรีนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจนได้ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4) จากนั้นเจือจางไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ด้วยโซเดียมหรือแมกนีเซียมที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดเป็นฟองไทเทเนียม (Ti sponge) และได้ผลผลิตพลอยได้คือแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) เมื่อแยกแมกนีเซียมคลอไรด์ออกจึงรวมฟองไทเทเนียมเข้าด้วยกันภายใต้สุญญากาศหรือก๊าซอาร์กอน (argon atmosphere) ได้เป็นก้อนโลหะไทเทเนียม (Ti ingots) (Brown, 1997) การค้นพบกระบวนการนี้ทำให้เขาได้ชื่อว่าเป็นบิดาแห่งอุตสาหกรรมไทเทเนียม (Wang & Fenton, 1996)

ที่อุณหภูมิห้อง ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกเป็นทรงกระบอกหกเหลี่ยมแบบอัดแน่น (hexagonal closed-pack : HCP) ซึ่งอยู่ในรูปแบบอัลฟา (alpha form) เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 883 องศาเซลเซียสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกไปเป็นลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ (body centered cubic : BBC) ซึ่งอยู่ในรูปแบบเบตา (beta form) โดยโครงสร้างผลึกลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์จะคงอยู่จนถึงจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส (Lautenschlager & Monaghan, 1993) เมื่อไทเทเนียมบริสุทธิ์มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจะทำให้สมบัติของมันเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (Parr et al., 1985) โดยไทเทเนียมบริสุทธิ์รูปแบบเบตาจะมีความแข็งแรงสูงกว่า แต่มีความเปราะมากกว่ารูปแบบแอลฟา (ADA council on scientific affairs, 2003; Craig & Powers, 2002) นอกจากนี้การเติมธาตุบางอย่างลงไปเพียงเล็กน้อยในขั้นตอนการผลิต ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และเหล็ก สามารถเพิ่มกลสมบัติของไทเทเนียมได้อย่างมีนัยสำคัญ เช่น ความแข็งผิว (hardness) กำลังดึงประลัย (ultimate tensile strength) ความทนแรงคราก (yield strength) (Parr et al., 1985; Wang & Fenton, 1996) และการปนเปื้อนของออกซิเจนจากบรรยากาศแม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยในระหว่างการผลิตสามารถทำให้ไทเทเนียมบริสุทธิ์สูญเสียสภาพดึงยืดได้ (ductility) ได้อย่างมีนัยสำคัญ (ADA council on scientific affairs 2003)

The American Society of Testing and Materials (ASTM) ได้จำแนกไทเทเนียมบริสุทธิ์เป็น 4 เกรด ตามส่วนผสมของออกซิเจน ไนโตรเจน เหล็ก และคาร์บอนที่เติมลงไประหว่างขั้นตอนการผลิต (Wang & Fenton, 1996) ดังที่ได้แสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดและปริมาณธาตุสูงสุดที่เติม (maximum impurity) และกลสมบัติขั้นต่ำ (minimum mechanical properties) ของไทเทเนียมบริสุทธิ์

Type	Impurity limit					Tensile	Yield	Elongation
	N	Fe	O	C	H	strength	strength	
ASTM I	0.03	0.2	0.18	0.1	0.015	240	170	24
ASTM II	0.03	0.3	0.25	0.1	0.015	340	280	20
ASTM III	0.05	0.3	0.35	0.1	0.015	450	380	18
ASTM IV	0.05	0.5	0.40	0.1	0.015	550	480	15

ไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรด 1 (grade I Titanium) มีความบริสุทธิ์มากที่สุด ประกอบด้วยธาตุออกซิเจนไม่เกินร้อยละ 0.18 โดยน้ำหนัก และธาตุเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักจึงมีความอ่อนมากที่สุด มีสภาพดึงยืดได้ (ductility) มากที่สุดโดยมีค่าร้อยละของการยืดตัว (% elongation) เท่ากับ 24 และมีค่าความทนแรงดึงต่ำสุด (tensile strength) เท่ากับ 240 เมกกะปาสคาล ในขณะที่ไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรด 4 (grade IV Titanium) จะมีความแข็งแรงมากที่สุด มีสภาพดึงยืดได้น้อยสุดโดยมีค่าร้อยละของการยืดตัวเท่ากับ 15 ประกอบด้วยธาตุออกซิเจนไม่เกินร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก และธาตุเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงต่ำสุดเท่ากับ 550 เมกกะปาสคาล ส่วนธาตุไนโตรเจน ไฮโดรเจน และคาร์บอน จะมีอยู่เป็นองค์ประกอบในไทเทเนียมบริสุทธิ์ทุกเกรดไม่เกินร้อยละ 0.03, 0.015 และ 0.1 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ไทเทเนียมมีความหนาแน่นประมาณ 4.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้มีน้ำหนักเบากว่าโลหะทองผสม โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมหรือโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียม มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ประมาณ 100-104 กิกะปาสคาล (GPa) ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะผสมทองแต่น้อยกว่าโลหะผสมโคบอลต์-โครเมียมครึ่งหนึ่ง มีค่าความทนแรงครากอยู่ระหว่าง 170 ถึง 480 เมกกะปาสคาล มีค่ากำลังปะลัยอยู่ระหว่าง 240 ถึง 550 เมกกะปาสคาล และมีค่าร้อยละของการยืดตัวประมาณ 15-24 ไทเทเนียมจึงเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบสัดส่วนต่อน้ำหนัก มีความยืดหยุ่นสูง นำความร้อนต่ำ ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของโลหะที่นำมาใช้ในงานทันตกรรม (Wang & Fenton, 1996) ดังที่ได้แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของไทเทเนียม โลหะผสมไทเทเนียม โลหะผสมทอง โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม

Properties	CP Ti	Ti-6Al-4V	Au alloys	Ni-Cr alloys
Density (g/cm ³)	4.51	4.43	18.3-19.3	4.47-9.5
Microhardness (VHN)	130-210	350	125-240	270-350
Elongation (%)	15-24	10	10-18	1.1-2.4
Yield strength (MPa)	241-548	890	~420	~450-760
Melting point (°C)	1670	1760	~900	~1430
Coefficient of thermoexpansion (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	9.7	11.8	14.7-15.6	14.1-16.3

การรีดเย็น (cold working) สามารถเพิ่มความทนแรงดึงให้แก่ไทเทเนียมบริสุทธิ์ โดยไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรด 4 ที่ผ่านการรีดเย็นจะมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 800 เมกะปาสคาล ซึ่งเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานทางทันตกรรมรากเทียมได้ (Brown, 1997) อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้งานของไทเทเนียมบริสุทธิ์ยังคงมีข้อจำกัดเนื่องจากยังมีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ ชัดแตงยาก และมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนต่ำ (Hirata et al., 2001) ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในบริเวณที่มีความเค้นสูง เช่น สะพานฟันที่ยาวหรือโครงโลหะฟันเทียมถอดได้ (Ida et al., 1985) จึงได้มีการนำโลหะผสมไทเทเนียม (titanium alloys) มาใช้ในทางทันตกรรมโดยพัฒนามาจากโลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้เป็นวัสดุอากาศยาน

1.2 โลหะผสมไทเทเนียม

ไทเทเนียมบริสุทธิ์สามารถทำเป็นโลหะผสมกับธาตุได้หลายชนิด วัตถุประสงค์ของการผลิตโลหะผสมไทเทเนียมคือ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความต้านทานต่อการคืบ (creep resistant) เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกันได้ (weldability) สามารถตอบสนองต่อการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน (heat treatment) และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย (formability) (Lautenschlager & Monaghan, 1993)

โลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้ในทางทันตกรรมมีรูปแบบโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแอลฟา (alpha form) รูปแบบเบตา (beta form) และรูปแบบแอลฟา-เบตา (alpha-beta form) แต่ละรูปแบบเกิดจากการเติมธาตุต่างๆ ลงไปในสัดส่วนที่เหมาะสมขณะที่ให้ความร้อนแก่ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ธาตุที่ผสมลงไปจะทำหน้าที่เป็นตัวคงสถานะ โครงสร้างผลึก (phase-condition

stabilizer) (Parr et al., 1985) เช่น อะลูมิเนียม (Al) แกลเลียม (Ga) ดีบุก (Sn) รวมทั้งคาร์บอน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำหน้าที่เป็นตัวคงสภาพแอลฟา (alpha stabilizer) ในขณะที่บางธาตุ เช่น วานาเดียม (V) ไนโอเบียม (Nb) โมลิบดีนัม (Mo) ทำหน้าที่เป็นตัวคงสภาพเบตา (beta stabilizer) ของโลหะผสมไทเทเนียม (Lautenschlager & Monaghan, 1993; McCracken, 1999) ซึ่งรูปแบบแอลฟาทำให้ไทเทเนียมมีสมบัติสามารถเชื่อมต่อไปได้ มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี แต่จะขึ้นรูปได้ยากที่อุณหภูมิห้อง ส่วนรูปแบบเบตาทำให้มีสมบัติสามารถตีให้แผ่ได้ (malleable) ที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่โลหะผสมไทเทเนียมแอลฟา-เบตา จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่จะเชื่อมต่อไปยาก (Craig & Powers, 2002; Taira, Moser, & Greener, 1989)

โลหะผสมไทเทเนียมที่นิยมมากที่สุดทางทันตกรรมคือโลหะผสมไทเทเนียมที่ประกอบด้วยไทเทเนียมร้อยละ 90 อะลูมิเนียมร้อยละ 6 และวานาเดียมร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หรือ Ti-6Al-4V (Lautenschlager & Monaghan, 1993; Parr et al., 1985; Wang & Fenton, 1996) โดยที่อุณหภูมิห้องจะประกอบด้วยโครงสร้างทั้งแอลฟาและเบตา โดยอะลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นตัวคงสภาพแอลฟา ทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีน้ำหนักเบา ส่วนวานาเดียมทำหน้าที่เป็นตัวคงสภาพเบตา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 975 องศาเซลเซียส โลหะผสมจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ ดังนั้น สามารถทำการปรับปรุงสมบัติโดยใช้ความร้อน (thermal treatment) เพื่อกำหนดปริมาณหรือโครงสร้างที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพและกลสมบัติของโลหะผสมตามต้องการ

เมื่อเปรียบเทียบกลสมบัติของโลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) กับไทเทเนียมบริสุทธิ์ พบว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับไทเทเนียมบริสุทธิ์ มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าไทเทเนียมบริสุทธิ์เล็กน้อย โดยอะลูมิเนียมและวานาเดียมที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในโลหะผสมประมาณร้อยละ 10 ทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นได้ประมาณร้อยละ 10 มีร้อยละของการยึดตัวต่ำกว่าเล็กน้อย มีสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนใกล้เคียงกับไทเทเนียมบริสุทธิ์ แต่มีกำลังดึงประลัยและความทนแรงครากสูงกว่าประมาณร้อยละ 60 และมีค่าความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness number : VHN) สูงกว่าไทเทเนียมบริสุทธิ์ประมาณ 3 เท่า (Lautenschlager & Monaghan, 1993; McCracken, 1999; Parr et al., 1985; Wang & Fenton, 1996)

1.3 สมบัติของไทเทเนียม

ไทเทเนียมเป็นวัสดุทางเลือก (material of choice) ที่ดีที่สุดตัวหนึ่งทางทันตกรรม เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ ได้แก่ น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

หรือความแข็งแรงต่ำ มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อเป็นอย่างดี เนื่องจากมีชั้นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงปกคลุม (Anusavice, 2003; Craig & Powers, 2002)

ความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อเป็นอย่างดีของโลหะไทเทเนียมซึ่งเป็นสมบัติที่เด่นมาก เกิดจากชั้นออกไซด์ที่มีความเสถียรต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของโลหะไทเทเนียม (Lautenschlager & Monaghan, 1993; Wang & Fenton, 1996) ทั้งไทเทเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสมไทเทเนียมสามารถเกิดออกไซด์ได้หลายชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ไทเทเนียมไตรออกไซด์ (Ti₂O₃) ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสภาพแวดล้อมขณะนั้น พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นออกไซด์ที่มีความเสถียรมากที่สุด สามารถคงตัวอยู่ได้ที่อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างในช่วงกว้าง ทำให้สามารถทนต่อสภาวะรีดิวซ์อย่างอ่อน สภาวะเป็นกลาง สภาวะออกซิไดซ์ที่รุนแรง และทนต่ออุณหภูมิสูงได้ (Kasemo, 1983; Parr et al., 1985; Wang & Fenton, 1996) เมื่อไทเทเนียมสัมผัสกับอากาศจะเกิดชั้นออกไซด์หนาประมาณ 10 อังสตรอม ในช่วงเวลาเป็นมิลลิวินาที และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็นวินาทีชั้นออกไซด์จะหนาขึ้นถึง 100 อังสตรอม ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้โลหะไทเทเนียมมีสมบัติเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ในสภาวะปกติอัตราการละลายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าน้อยมาก โดยจะพบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ผิวของโลหะไทเทเนียมเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้พบว่าชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถซ่อมแซมตัวเองได้เมื่อถูกทำลาย โดยการซ่อมแซมจะเกิดขึ้นทันทีเมื่อชั้นออกไซด์ได้รับความเสียหาย (Parr et al., 1985; Wang & Fenton, 1996) และเนื่องจากชั้นออกไซด์มีสมบัติที่ไม่ยอมให้สารซึมผ่านได้ ดังนั้นเมื่อเกิดชั้นออกไซด์ชั้นออกซิเจนจากภายนอกจึงไม่สามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะไทเทเนียมเกิดเป็นชั้นออกไซด์ได้อีก เมื่อชั้นออกไซด์ถูกสร้างได้ความหนาระดับหนึ่งแล้วจะหยุดการสร้างโดยทันที ซึ่งองค์ประกอบโครงสร้างความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ วิธีการขึ้นรูป ความหยาบของผิว ชนิดของสารหล่อเย็นขณะขึ้นรูป และขั้นตอนการทำให้ปราศจากเชื้อ และชั้นออกไซด์ดังกล่าวยังมีสมบัติที่ยอมให้ของเหลว โปรตีน รวมทั้งเนื้อเยื่ออ่อนและเนื้อเยื่อแข็งภายในร่างกายเข้ามาสัมผัสและยึดติดกับพื้นผิวได้โดยตรง จึงมีประโยชน์ในทางทันตกรรมรากเทียม

1.5 การหล่อแบบ (casting) และวัสดุทำเบ้า (mold material) สำหรับไทเทเนียม

การนำโลหะไทเทเนียมมาใช้งานโดยการขึ้นรูปโลหะไทเทเนียมสำหรับฟันปลอมถอดได้ รวมทั้งฟันปลอมแบบติดแน่นสามารถทำได้หลายวิธี การหล่อแบบขึ้นงานเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมในปัจจุบัน แต่เนื่องจากสมบัติบางประการของไทเทเนียม เช่น การมีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นต่ำ และการเกิดปฏิกิริยาบริเวณชั้นผิวของไทเทเนียมกับวัสดุทำเบ้า

หล่อได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ทำให้การหล่อแบบของโลหะไทเทเนียมทำได้ยาก จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อแบบตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา โดยทั่วไปเครื่องหล่อแบบสำหรับโลหะไทเทเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ ได้แก่ (Anusavice, 2003)

1.5.1 ระบบใช้แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลาง (centrifugal casting type) ได้แก่ เครื่องหล่อแบบใช้ระบบที่ทำการหลอมโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าภายใต้สุญญากาศหรือก๊าซเฉื่อย และใช้แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางแนวนอนหรือแนวตั้งเพื่อเหวี่ยงโลหะเข้าสู่เบ้าเพื่อขึ้นรูป (Inert gas arc-melting with vertical or horizontal centrifugal casting machine) ตัวอย่างของเครื่องหล่อแบบระบบนี้ ได้แก่ Titaniumer-VF (Ohara, Japan), Ticast Super R (Selec, Japan), Tycast 3000 (Yoshida, Japan)

1.5.2 ระบบใช้แรงดันก๊าซหรือแรงดูด (gas pressure or suction type) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ

1.5.2.1 ชนิด 2 ห้อง (two-chamber type) ได้แก่ เครื่องหล่อแบบใช้แรงดันก๊าซร่วมกับการหลอมภายใต้ก๊าซเฉื่อย (Inert gas arc-melting/gas pressure casting machine) ระบบนี้ประกอบด้วย 2 ห้องแยกจากกัน โดยห้องที่อยู่ด้านบนเป็นห้องสำหรับหลอมโลหะ โดยโลหะจะถูกหลอมด้วยกระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน จากนั้นโลหะที่หลอมเหลวจะถูกผลักดันลงสู่ห้องด้านล่างซึ่งเป็นห้องสำหรับขึ้นรูปด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงดันก๊าซเฉื่อย ตัวอย่างของเครื่องในระบบนี้ ได้แก่ Castmatic (Yoshida, Japan)

1.5.2.2 ชนิดห้องเดียว (one-chamber type) ได้แก่ เครื่องหล่อแบบใช้แรงดันก๊าซร่วมกับการหลอมโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนเพื่อหลอมโลหะ และใช้แรงดันก๊าซในการขึ้นรูป ตัวอย่างของเครื่องระบบนี้ ได้แก่ Cyclarc II (J Morita, Japan)

1.5.3 ระบบผสม (mixed type) เป็นระบบที่ใช้แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางร่วมกับแรงดันก๊าซ ตัวอย่างของเครื่องในระบบนี้ ได้แก่ Valcan-T (Shofu, Japan)

สมบัติของวัสดุทำเบ้าหล่อหรืออินเวสต์เมนต์ (investment) เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดความสำเร็จหรือความล้มเหลวของการหล่อแบบไทเทเนียม ซึ่งสมบัติที่ต้องการของวัสดุทำเบ้าหล่อแบบสำหรับไทเทเนียม ได้แก่

1. สามารถทนต่อความร้อนสูงได้โดยแบบหล่อยังคงมีความเสถียรและแข็งแรงที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของไทเทเนียม (ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส)
2. มีการขยายตัวที่เหมาะสมเพื่อชดเชยการหดตัวของไทเทเนียมจากการหล่อแบบ
3. มีเสถียรภาพทางเคมี (chemical stability) สามารถยับยั้งไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไทเทเนียม

ในระยะแรกวัสดุทำเบ้าหล่อที่ใช้สำหรับการหล่อไทเทเนียม เป็นวัสดุทำเบ้าหล่อชนิดซิลิกา (silica-based investment) แต่เนื่องจากจุดหลอมเหลวของซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของไทเทเนียม ทำให้ซิลิกาสามารถเกิดปฏิกิริยากับไทเทเนียมที่หลอมเหลวได้ง่าย ทำให้เกิดสิ่งแปลกปลอม (irregularity) หรือชั้นแข็ง (hardened layers) บนผิวของชิ้นงานโลหะไทเทเนียม ด้วยเหตุนี้เบ้าหล่อที่ทำจากซิลิกาจึงไม่เหมาะสมสำหรับการหล่อไทเทเนียม ต่อมาได้มีการพัฒนาวัสดุชนิดอื่นที่สามารถทนความร้อนสูงได้ และมีความเสถียรมากกว่าซิลิกา ได้แก่ อะลูมินา (alumina) แมกนีเซีย (magnesia) เซอร์โคเนีย (zirconia) และแคลเซีย (calcia) เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับทำเบ้าหล่อชิ้นงานไทเทเนียม อะลูมินาเป็นวัสดุทำเบ้าหล่อที่เกิดปฏิกิริยากับไทเทเนียมได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุทำเบ้าหล่อชนิดอื่น ส่วนแมกนีเซียมีข้อด้อยคือใช้เวลาก่อตัวนาน มีการขยายตัวน้อยและมักเกิดรอยแตกเมื่อได้รับความร้อน เซอร์โคเนียและแคลเซียเป็นวัสดุทำเบ้าหล่อที่เกิดปฏิกิริยากับไทเทเนียมน้อยที่สุด จึงมีข้อดีคือสามารถนำชิ้นงานออกจากแบบหล่อได้ง่ายและได้ผิวของชิ้นงานโลหะที่มีความมันวาวสูง (high metallic luster) ดังนั้นเซอร์โคเนียและแคลเซียจึงค่อนข้างเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุทำเบ้าหล่อสำหรับชิ้นงานโลหะไทเทเนียม อย่างไรก็ตามทั้งเซอร์โคเนียและแคลเซียยังคงมีข้อด้อยคือ มีอายุการใช้งานสั้นและระยะเวลาก่อตัวนาน (Mori, 1993) Togaya ได้เสนอวิธีการปรับปรุงสมบัติของแมกนีเซียให้สามารถใช้งานได้ดีขึ้น โดยการเติมอะลูมินาหรือเซอร์โคเนียลงไปเพื่อให้มีการขยายตัวมากขึ้น สามารถชดเชยต่อการหดตัวของไทเทเนียมได้ดีขึ้น (Togaya et al., 1992; Togaya, Suzuki, Tsutsumi, & Ida, 1983)

2. พอร์ซเลนทันตกรรม (dental porcelain)

พอร์ซเลนเป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวกันของโลหะหรือกึ่งโลหะกับออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อนำมาใช้ในงานทันตกรรมในระยะแรกนำมาทำครอบฟัน วีเนียร์ และอินเลย์ ซึ่งเป็นพอร์ซเลนที่สมบัติยังไม่ดี ไม่แข็งแรงแตกหักง่าย ต่อมาได้พัฒนาให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ขึ้นต่อมาใช้วิธีขึ้นรูปโดยใช้โลหะบาง ๆ รองรับ เช่น ทอง แพลตตินัม เพื่อลดการแตกหัก ในระยะเวลาดังกล่าวได้พัฒนาเป็นพอร์ซเลนเคลือบบนครอบฟันที่เป็นโลหะซึ่งให้ทั้งความสวยงามและความแข็งแรง

2.1 องค์ประกอบของพอร์ซเลนทันตกรรม

พอร์ซเลนทันตกรรมมีองค์ประกอบที่แตกต่างจากพอร์ซเลนที่ใช้เครื่องทำเครื่องครัวและเครื่องสุขภัณฑ์ ซึ่งพอร์ซเลนทันตกรรมธรรมดา (conventional dental porcelain) เป็นสารประกอบจำพวกโปแทสเซิลด์สปาร์ (potash feldspar) หรือ โซดาเฟลด์สปาร์ (soda feldspar) ผสมกับอะลูมินา



และซิลิกาโดยมีสัดส่วนโดยประมาณ คือซิลิกา (SiO_2) 52-62 เปอร์เซ็นต์ อะลูมินา (Al_2O_3) 11-16 เปอร์เซ็นต์ และได้มีการผสมสารอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่น การหดตัว การละลายตัว อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเผา ได้แก่โปแทช (K_2O) 9-11 เปอร์เซ็นต์ หรือโซดา (Na_2O) 5-7 เปอร์เซ็นต์ อาจจะผสมลิเทียมออกไซด์ (Li_2O) และแบเรียมออกไซด์ (BaO) ด้วย มีการผสมสารจำพวกรงควัตถุ (pigments) เพื่อให้ได้สีแตกต่างกันไป ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์โลหะชนิดต่างๆ เช่น ออกไซด์ของเหล็กหรือนิกเกิลจะให้สีน้ำตาล ออกไซด์ของทองแดงจะให้สีเขียว ออกไซด์ของไทเทเนียมจะให้สีน้ำตาลอมเหลือง ออกไซด์ของแมงกานีสให้สีม่วง ออกไซด์ของโคบอลต์ให้สีฟ้า กลุ่มจำพวกสารทึบแสง (opacifiers) จะเป็นออกไซด์ของ ดิบุก เซอร์เรียม (cerium) เซอร์โคเนียม (zirconium) ไทเทเนียม กลุ่มจำพวกสารปรับสมบัติของแก้ว (glass modifiers) เป็นส่วนผสมที่ใส่เพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการเผาพอร์ซเลนให้เหมาะสม ซึ่งจะเป็นพวกไอออนโลหะที่เป็นค่า (alkaline metal ions) เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม ทำให้อุณหภูมิลดลงเนื่องจากส่วนประกอบเหล่านี้จะทำให้ผลึกซิลิกามีความแข็งแรงลดลง มีการเปลี่ยนรูปได้ง่ายทำให้การเผาใช้อุณหภูมิลดลงและเพิ่มการขยายตัว (thermal expansion) ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มตามอุณหภูมิการเผาได้เป็น ชนิดเผาอุณหภูมิสูง (high-fusing) เผาที่อุณหภูมิมากกว่า 1300 องศาเซลเซียส และชนิดเผาอุณหภูมิปานกลาง (medium-fusing) เผาที่อุณหภูมิ 1101-1300 องศาเซลเซียส ทั้งสองชนิดส่วนมากใช้ทำเป็นซีฟีนปลอม ส่วนชนิดเผาอุณหภูมิต่ำ (low-fusing) เผาที่อุณหภูมิ 850-1100 องศาเซลเซียส และชนิดเผาอุณหภูมิต่ำกว่า (ultra-low fusing) เผาที่อุณหภูมิน้อยกว่า 850 องศาเซลเซียส ใช้ทำกรอบฟันและสะพานฟัน (Anusavice, 2003)

2.2 การพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติพอร์ซเลนทันตกรรม

เนื่องจากพอร์ซเลนมีส่วนประกอบที่เป็นแก้วในปริมาณสูง ทำให้มีคุณสมบัติโปร่งแสงมีความสวยงาม แต่จะมีข้อจำกัดที่สำคัญคือมีความเปราะ แตกหักได้ง่ายจากแรงดึงหรือแรงคดโค้ง โดยเฉพาะเมื่อมีแรงกระทำต่อบริเวณที่มีรอยตำหนิ (flaw) หรือฟองอากาศ เพื่อให้พอร์ซเลนที่ใช้ในทางทันตกรรมทนทานต่อแรงบดเคี้ยว จึงมีการเสริมความแข็งแรงโดยการยึดติดกับโลหะหรือลดการเกิดรอยร้าวด้วยการเติมผลึกขนาดเล็ก (microcrystalline phase) การปรับสภาพพื้นผิว (surface treatment) ได้แก่ การขัด การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

การนำพอร์ซเลนมาใช้ร่วมกับโลหะจะมีข้อควรคำนึงถึงในเรื่องของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนระหว่างโลหะและพอร์ซเลนที่มีความแตกต่างกัน โดยที่โลหะและพอร์ซเลนจะมีการหดตัวในขณะที่เย็นตัวลงแตกต่างกันทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้ง่าย ซึ่งในปี ค.ศ. 1962 เวินสไตน์และคณะได้มีความพยายามทำให้เป็นกรอบฟันพอร์ซเลนเคลือบโลหะ

(ceramo-metal crown) โดยปรับปรุงสมบัติของพอร์ซเลนให้ดีขึ้นด้วยการเพิ่มโปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O) เมื่อผ่านกระบวนการเผาจะเกิดการก่อตัวของผลึกยูไรท์ (leucite) หรือโปตัสเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งโครงสร้างที่เป็นระเบียบของผลึกยูไรท์เป็นตัวให้ความแข็งแรงแก่พอร์ซเลนและเป็นตัวควบคุมค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอร์ซเลน เนื่องจากผลึกนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของพอร์ซเลนเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับโลหะจึงสามารถเคลือบพอร์ซเลนบนโลหะได้เป็นผลสำเร็จ (Binns, 1983; Craig & Powers, 2002)

การยึดระหว่างพอร์ซเลนกับโลหะช่วยป้องกันการแตกร้าวของพอร์ซเลนได้ เนื่องจากแรงบดเคี้ยวอาจทำให้เกิดความเค้นดึง (tensile stress) ในบางบริเวณ มีผลให้ขอบชิ้นงานแอ่นและเกิดความเค้นดัด (bending stress) ดังนั้นโลหะซึ่งทนต่อความเค้นดึงได้มากกว่าจะต้านแรงที่เกิดขึ้นและควรให้โลหะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนสูงกว่าพอร์ซเลนเล็กน้อย จะมีผลให้ในขณะมีการเย็นตัวของวัสดุตามอุณหภูมิห้อง โลหะหดตัวได้มากกว่าเล็กน้อยทำให้เกิดความเค้นกดอัด (compressive stress) จากการหดตัวหลงเหลืออยู่ที่พอร์ซเลนบริเวณผิวทำให้พอร์ซเลนมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากทนต่อความเค้นกดอัดได้ดีแต่ไม่ทนต่อความเค้นดึง เพราะฉะนั้นเมื่อมีแรงบดเคี้ยวมากระทำทำให้เกิดความเค้นดึง จะหักล้างกับความเค้นกดอัดที่เหลืออยู่ที่ชั้นพอร์ซเลนทำให้พอร์ซเลนไม่แตกออก (O'Brien, 2000)

การเผาเพื่อให้ส่วนประกอบหลอมเป็นเนื้อเดียวกันควรใช้จำนวนรอบในการเผาน้อยที่สุด ควรหลีกเลี่ยงการเผาซ้ำหลายครั้ง เผาเท่าที่จำเป็นและไม่ใช้เวลานานเกินไปจะทำให้การหดตัวขยายตัวไม่สมดุลกับโลหะจะเกิดการแตกร้าวได้ง่าย เพราะปกติจะมีการเติมผงยูไรท์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่พอร์ซเลนโดยยูไรท์จะอยู่ในรูปแบบที่มีการขยายตัวสูงอยู่แล้ว หากเราทำการเผาหลายๆ รอบจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการของยูไรท์ จะเกิดมีปริมาณของยูไรท์มากขึ้นเป็นผลให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของพอร์ซเลนเพิ่มขึ้นจนอาจมีค่าสูงกว่าของโลหะได้ ซึ่งเมื่อชิ้นงานมีการเย็นตัวลงอาจทำให้เกิดรอยร้าวที่บริเวณขึ้นได้ ในช่วงเริ่มต้นการเผาไม่ควรเร่งอุณหภูมิมากเพราะน้ำที่ประสานอยู่จะระเหยอย่างรวดเร็วชิ้นงานจะแตก หรือเผาในระบบสุญญากาศ (vacuum firing) จะช่วยลดฟองอากาศในเนื้อวัสดุได้ เพราะความดันที่สูงจะช่วยบีบอัดฟองอากาศให้เล็กลงเพิ่มความแข็งแรงของพอร์ซเลนได้ (O'Brien, 2000; Anusavice, 2003)

โดยปกติในผลึกแก้วที่เป็นส่วนประกอบของพอร์ซเลนจะมีโซเดียมไอออนอยู่ เมื่อมีการเคลือบพอร์ซเลนด้วยเกลือของโปแทสเซียมจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งโปแทสเซียมไอออนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าของโซเดียมไอออนประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์จะเข้าไปแทนที่

โซเดียมไอออนในผลึกของพอร์ซเลน ทำให้โมเลกุลของอ็อกซิเจนในผลึกพอร์ซเลนเบียดกันแน่นมากขึ้นจึงทำให้โมเลกุลอยู่กันแน่นขึ้น เนื้อพอร์ซเลนมีความแข็งแรงขึ้น (O'Brien, 2000)

การเติมผลึกโลหะ ลิเทียมไดซิลิเกต อะลูมินา แมกนีเซียมอะลูมิเนียมเซอร์โคเนีย หรือผลึกแก้วอื่น ๆ ซึ่งผลึกที่เติมลงไปนี้จะมีการกระจายตัวของอยู่ทั่วไปในเนื้อพอร์ซเลน ทำให้ผลึกเหล่านี้ไปเบียดรอยร้าวที่ปกติแล้วจะพบอยู่ในเนื้อวัสดุหรือไปเป็นตัวหยุดไม่ให้รอยร้าวขยายตัวผ่านผลึกเหล่านี้ได้ เมื่อรอยร้าวเหล่านี้ถูกเบียดหรือมีจำนวนลดลงทำให้ลดการแตกหักของเนื้อพอร์ซเลนได้ ดังนั้นถ้ามีผลึกมากก็จะมีความแข็งแรงมาก แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้พอร์ซเลนมีความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้การเผา การเคลือบเงา (glaze) หรือการขึ้นรูปยากขึ้นด้วย (O'Brien, 2000)

กรอบฟันโลหะเคลือบพอร์ซเลนมีข้อดีที่สำคัญคือ โครงโลหะภายในจะลดการส่องผ่านของแสงทำให้ฟันแลดูไม่เป็นธรรมชาติ อาจทำให้ขอบเหงือกดำจากโลหะและผู้ป่วยบางรายอาจมีการแพ้ของโลหะ (Rosenblum & Schulman, 1997) ดังนั้น จึงมีความพยายามในการทำกรอบฟัน พอร์ซเลนที่ปราศจากโลหะ แต่เนื่องจากเฟลด์สปาร์ติกพอร์ซเลนนั้นไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะทำกรอบฟันพอร์ซเลนได้ โดยเฉพาะในตำแหน่งที่มีแรงจากการบดเคี้ยวมาก จึงได้มีการพัฒนาพอร์ซเลนให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยในปี ค.ศ.1965 McLean และ Muges ได้พัฒนาอะลูมินัสพอร์ซเลนจากเฟลด์สปาร์ติกพอร์ซเลน โดยแทนที่ควอตซ์ด้วยอะลูมินา 40-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อใช้เป็นแกนภายในกรอบฟันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของพอร์ซเลน ซึ่งมีความสวยงามโดยไม่ต้องมีโครงโลหะภายใน และอะลูมินัสพอร์ซเลนมีค่าความทนแรงดัดเพิ่มขึ้นถึง 100-130 เมกกะปาสกาล (Giordano, 1996) โดยอะลูมินาที่ใช้เป็นผงละเอียดขนาด 10-20 ไมครอนผสมกับแก้วเมทริกซ์ (glass matrix) ซึ่งอะลูมินานี้ทำหน้าที่เสมือนตัวหยุดรอยแตก (crack stopper) อะลูมินาและแก้วเมทริกซ์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่างกันเล็กน้อยทำให้เมื่อพอร์ซเลนเย็นตัวลงเกิดเป็นความเค้นกดอัดรอบๆ อะลูมินา ซึ่งความเค้นกดอัดนี้เองที่สามารถหยุดการแพร่ของรอยแตกได้ กรอบฟันอะลูมินัสพอร์ซเลนประกอบด้วยสามส่วน คือ ส่วนแกนอะลูมินาที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนประมาณ $7.95 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ค่าความทนแรงดัดประมาณ 130-150 เมกกะปาสกาล ส่วนที่สองและสามคือวีเนียร์พอร์ซเลนชั้นเคลือบฟันและชั้นเนื้อฟันซึ่งทำจากแก้วบอโรซิลิเกต (borosilicate) มีอะลูมินาร้อยละ 5-10 เป็นส่วนที่ให้สีและความโปร่งแสงแก่กรอบฟันพอร์ซเลน ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนประมาณ $7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ดังนั้นเมื่อมีการเย็นตัวลงพอร์ซเลนเคลือบฟันจะอยู่ภายใต้ความเค้นกดอัดและสามารถต้านทานต่อรอยแตก ทำให้กรอบฟันพอร์ซเลนมีความแข็งแรงขึ้น อย่างไรก็ตามกรอบฟันชนิดนี้ยังมีความแข็งแรงไม่เพียงพอและมีการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อนำไปใช้งานในคลินิก อีกทั้งอะลูมินัสพอร์ซเลนมี

การหัดด้วยตะเภาทำให้ความแนบของครอบฟันต่ำกว่าพอร์ซเลนเคลือบโลหะ (Rosenblum & Schulman, 1997)

3. การยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลนและระหว่างไทเทเนียมกับพอร์ซเลน

3.1 การยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลน

การยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลนจะขึ้นกับกระบวนการเผา โดยกลไกการยึดติดถูกแบ่งออกเป็น 4 จำพวก ได้แก่ พันธะเคมี (chemical bond), การยึดทางกล (mechanical retention), การยึดจากแรงกดอัด (compressive forces), และแรงวันเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) (Naylor, 1992)

พันธะเคมี (chemical bond)

โดยส่วนใหญ่แล้วมีความเชื่อว่ากลไกการยึดระหว่างพอร์ซเลนกับโลหะเกิดจากพันธะเคมีระหว่างพอร์ซเลนและออกไซด์ของโลหะบริเวณพื้นผิว โดยมีความเชื่อตามทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกการเกิดพันธะเคมีอยู่สองทฤษฎี ทฤษฎีแรกเชื่อว่าโลหะจะเกิดชั้นออกไซด์ที่ยึดแน่นบริเวณพื้นผิวอยู่ก่อนและพอร์ซเลนเกิดพันธะยึดกับชั้นออกไซด์ ซึ่งชั้นออกไซด์จะอยู่ระหว่างโลหะกับโอเพก พอร์ซเลน ซึ่งทฤษฎีนี้สิ่งที่ไม่พึงปรารถนาคือถ้ามีชั้นออกไซด์ที่หนาเกินไปจะทำให้การยึดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลนแข็งแรงน้อยลง ทฤษฎีที่สองเชื่อว่าชั้นของออกไซด์จะมีการละลายตัวหรือถูกละลายโดยชั้นโอเพก (opaque) ซึ่งอะตอมของพอร์ซเลนถูกนำเข้าไปสัมผัสกับพื้นผิวของโลหะในลักษณะการเปียก (wetting) และเกิดพันธะเคมีโดยตรงกับโลหะ ดังนั้นโลหะกับพอร์ซเลนจะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกัน ซึ่งการเกิดพันธะเคมีทั้งสองทฤษฎีสามารถเกิดได้ทั้งพันธะโควาเลนต์และพันธะไอออนิก โดยเฉพาะชั้นออกไซด์เป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้เกิดพันธะเคมีเกิดขึ้นได้ (Mackert, Parry, Hashinger, & Fairhurst, 1984)

เพราะฉะนั้นการยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลนจึงต้องทำให้เกิดชั้นออกไซด์บนผิวโลหะจึงสามารถยึดติดกับพอร์ซเลนได้ ในกลุ่มโลหะมีตระกูล (noble metals) เป็นโลหะที่เกิดชั้นออกไซด์ได้ยากจึงต้องผสมโลหะชนิดอื่นเพื่อให้สามารถเกิดชั้นออกไซด์ได้ดีขึ้น และได้แนะนำให้ทำการเผาเพื่อให้เกิดออกไซด์ของโลหะก่อนการสร้างชั้นพอร์ซเลน (Craig & Powers, 2002) นอกจากนี้โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม หรือโลหะผสมในกลุ่มโลหะพื้นฐาน จำเป็นต้องทำขั้นตอนการเผาเพื่อให้เกิดออกไซด์ก่อนการสร้างชั้นพอร์ซเลนเสมอเพราะมีผลให้การยึดติดแข็งแรงมากขึ้น (Mackert et al., 1984) แต่การยึดติดระหว่างไทเทเนียมกับพอร์ซเลนจะให้ผลตรงกันข้าม Kimura และคณะรายงานผลของการเกิดออกไซด์ชั้นบนพื้นผิวของพอร์ซเลนกับไทเทเนียม โดยสรุปว่า

ขั้นตอนการเผาเพื่อให้เกิดออกไซด์ของโลหะไม่เหมาะกับการยึดติดระหว่างพอร์ซเลนกับไทเทเนียมและการเผาควรใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส เพื่อลดการสร้างออกไซด์บนชั้นของไทเทเนียม (Kimura et al., 1990)

การยึดทางกล (mechanical retention)

บริเวณพื้นผิวของชั้นโลหะที่สัมผัสกับพอร์ซเลนที่เหมาะสมนั้น จะเป็นพื้นผิวที่เรียบแต่มีลักษณะผิวหยาบคือมีความขรุขระขนาดเล็กละเอียดในระดับไมโคร (microscopic irregularities) ซึ่งทำให้โอเพคพอร์ซเลน (opaque porcelain) สามารถไหลเข้าได้ การเป่าทรายที่บริเวณผิวโลหะด้วยผงอะลูมินาเชื่อว่าจะเป็นการส่งเสริมให้เกิดการยึดทางกลมากขึ้น โดยจะเป็นขจัดพื้นผิวที่ไม่เรียบและสร้างความขรุขระขนาดเล็กๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่จะทำให้สามารถเกิดการยึดติดได้มากขึ้น

การเคลือบพอร์ซเลนกับโลหะ เป็นการเคลือบเป็นชั้นๆ โดยโอเพคพอร์ซเลนเป็นชั้นแรก ซึ่งจะเข้าไปเติมบริเวณผิวขรุขระบนชั้นของโลหะ และเป็นชั้นเริ่มต้นของการยึดกันระหว่างพอร์ซเลนกับโลหะ คล้ายกับการทาสีซึ่งมีการทาสีรองพื้นชั้นแรกก่อนจากนั้นจึงทาสีที่ต้องการซึ่งก็คือการเคลือบด้วยเดนตินพอร์ซเลน (dentin porcelain) แต่การยึดทางกลเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอที่จะอธิบายได้ทั้งหมดถึงการยึดระหว่างชั้นพอร์ซเลนกับโลหะ (Naylor, 1992)

การยึดจากแรงกดอัด (compression bonding)

พอร์ซเลนจะมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อมีแรงกดอัด (compression) และจะอ่อนแอลงเมื่อมีแรงดึง (tension) ดังนั้น เมื่อสัมผัสประสิทธิภาพการขยายตัวจากความร้อนของโลหะมากกว่าพอร์ซเลน เมื่ออุณหภูมิลดลงพอร์ซเลนจะมีแรงกดอัดจากการที่โลหะหดตัวมากกว่าเล็กน้อย (McLean & Wilson, 1980) แต่มีข้อสงสัยในทฤษฎีแรงกดอัดนี้ว่าไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกกรณี ในกรณีที่มีลักษณะของพอร์ซเลนที่มีการขึ้นรูปเต็มหรือมีโลหะบางส่วนด้านบดเคี้ยวหรือด้านไถลื่น เมื่อเย็นตัวลงโลหะมีการหดตัวเร็วกว่าพอร์ซเลน ความแตกต่างในอัตราการหดตัวนี้สามารถก่อให้เกิดแรงดึง (tensile forces) บนชั้นของโลหะได้เช่นเดียวกับเกิดแรงกดอัด (compressive force) บนชั้นของพอร์ซเลน (Yamamoto, 1985) เมื่อไม่มีลักษณะการโอบล้อมรอบ (wraparound effect) ในการบูรณะด้วยพอร์ซเลนทั้งหมดจึงมีความเป็นไปได้น้อยที่จะเกิดการยึดจากแรงกดอัด หรือในการบูรณะบางส่วนก็ยังไม่มีการโอบรอบมากเพียงพอให้เกิดแรงจากลักษณะนี้

แรงวันเดอร์วาล์ว (Van der Waals forces)

แรงวันเดอร์วาล์วคือแรงยึดที่เกิดจากการยึดกันระหว่างประจุที่แตกต่างกันของอะตอม ไม่ใช่การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนโดยตรง (Lacy, 1977) เป็นแรงเสริมที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างทางกายภาพระหว่างประจุอะตอมมากกว่า ไม่ใช่การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเหมือนแรงยึดหลักซึ่งก็คือพันธะทางเคมี แรงวันเดอร์วาล์วเป็นแรงยึดที่ค่อนข้างอ่อนแอ เพราะเป็นเพียงแรงจากประจุบวกและประจุลบที่อยู่ใกล้กันของอะตอมในโมเลกุลนั้น ซึ่งเป็นการยึดระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมในโมเลกุลเดียวกันและนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนของอะตอมในโมเลกุลใกล้เคียง ซึ่งเชื่อว่าแรงยึดนี้คือแรงที่ทำให้ฟอร์เลนที่เปียกยึดอยู่กับโลหะได้ขณะขึ้นรูป การยึดของฟอร์ชเลนกับโลหะสามารถที่จะลดหรือเพิ่มได้เมื่อพื้นผิวโลหะแตกต่างกันออกไป เช่น พื้นผิวที่ไม่ราบเรียบหรือการมีสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวโลหะสามารถขัดขวางการเปียก (wetting) ของฟอร์ชเลนขณะหลอมเหลวและทำให้แรงวันเดอร์วาล์วลดลง ในทางตรงกันข้าม พื้นผิวโลหะที่มีการขัดแต่งให้ราบเรียบ สะอาดไม่มีการปนเปื้อนและตามด้วยการเป่า (blasting) ด้วยผงอะลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 50 ไมครอนจะสามารถทำให้การเปียกของฟอร์ชเลนดีขึ้นได้ (Naylor, 1992)

3.2 การยึดติดระหว่างไทเทเนียมกับฟอร์ชเลน

ชั้นออกไซด์เป็นองค์ประกอบสำคัญในการยึดติดระหว่างไทเทเนียมกับฟอร์ชเลน เช่นเดียวกับโลหะชนิดอื่น แต่ไทเทเนียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีมากจึงเป็นปัญหาที่แตกต่างจากโลหะอื่นคือเกิดชั้นออกไซด์ที่หนามากเกินไป ชั้นออกไซด์ที่หนามีแนวโน้มที่เกิดจากการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงควรใช้อุณหภูมิการเผาที่ต่ำกว่าอุณหภูมินี้เนื่องจากชั้นออกไซด์ที่หนาเกินไปจะลดค่าความทนแรงยึด (bond strength) ระหว่างโลหะกับฟอร์ชเลน การใช้ฟอร์ชเลนชนิดจุดหลอมเหลวต่ำ (low fusing dental porcelain) เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการยึดติดของไทเทเนียมกับฟอร์ชเลน (Pang et al., 1995; Probst, Maiwald, & Weber, 1996) Adachi และคณะได้ศึกษาการยึดติดของฟอร์ชเลนที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกับไทเทเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสมไทเทเนียมด้วยเทคนิคการ x-ray spectrometric โดยวัดความทนแรงยึดในกลุ่มที่มีการเผาฟอร์ชเลนที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสและ 1000 องศาเซลเซียส พบว่าฟอร์ชเลนแยกออกจากชั้นของโลหะอย่างสมบูรณ์เมื่อมีการทดสอบค่าความทนแรงดัดขวาง (flexural test) อย่างคงที่มีฟอร์ชเลนหลงเหลือติดบนโลหะน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ การยึดของชั้นออกไซด์ของชิ้นงานในกลุ่มที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจะเกิดการออกซิไดซ์ที่ดีแต่มีลักษณะบางเกินไปจึงไม่สามารถมองเห็นได้จากกล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope) (Adachi, Mackert, Parry, &

Fairhurst, 1990) นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการยึดของไทเทเนียมและพอร์ซเลน ได้แก่ ความไม่สมดุลกันระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน (thermal expansion coefficients) ของไทเทเนียมและพอร์ซเลนควรมีค่าใกล้เคียงกัน หรือการเผาไทเทเนียมและพอร์ซเลนในสภาพแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศจะทำให้การยึดติดดีขึ้น (Kononen & Kivilahti, 2001)

มีหลายการศึกษาที่พยายามปรับปรุงความทนแรงยึด (bond strength) ของไทเทเนียมกับพอร์ซเลนโดยการปรับสภาพผิวของไทเทเนียมเพื่อพยายามลดการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งมีหลายวิธี

Wang และ Fung ได้ทำการศึกษาการควบคุมการเกิดออกไซด์ด้วยวิธีการพ่นเคลือบผิวโลหะด้วยโครเมียม (chromium sputter coating) และการเคลือบโลหะ ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส บนพื้นผิวของไทเทเนียม (electroplating) พบว่าอัตราการเกิดออกซิเดชันในกลุ่มที่เคลือบด้วยโครเมียมมีค่าต่ำที่สุด (Wang & Fung, 1997)

ในการศึกษาของ Papadopoulos ได้ใช้ผงอะลูมินาที่มีความละเอียดแตกต่างกันในการปรับสภาพพื้นผิวของไทเทเนียม พบว่าผงอะลูมินาที่มีขนาดใหญ่จะมีอะลูมินาที่ตกค้างอยู่ในพื้นผิวไทเทเนียมน้อยกว่าและสามารถทำให้ผิวไทเทเนียมมีความขรุขระ (surface roughness) มากกว่า ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการยึดทางกล (mechanical retention) มากขึ้น (Papadopoulos et al., 1999)

สำหรับการเผาพอร์ซเลนในบรรยากาศอาร์กอน ซึ่งจำกัดการเกิดออกซิเดชันของไทเทเนียมพบว่ามีเพียงบางกลุ่มที่มีการยึดติดของไทเทเนียมกับพอร์ซเลนดีขึ้น (Atsu & Berksun, 2000) และจากการศึกษาของ Sadeq พบว่าการเผาพอร์ซเลนในบรรยากาศอาร์กอนจะทำให้การยึดของไทเทเนียมกับพอร์ซเลนดีขึ้นสำหรับไทเทเนียมที่ผ่านการกลึงและการเหวี่ยง (Sadeq et al., 2003)

Donachi ได้รายงานว่ามีการใช้สารกัดกร่อนในอุตสาหกรรมสำหรับการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งสารละลายต่าง ๆ ที่นำมาใช้ เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไฮโดรฟลูออริก หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และพบว่ากรดไฮโดรฟลูออริกเป็นสารที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกัดผิวเพื่อปรับสภาพผิวของไทเทเนียม เนื่องจากสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้ดีช่วยให้สภาพพื้นผิวดีขึ้น (Donachie, 1988)

Cai รายงานว่าการรวมกันของสารละลายกรดไนตริกและกรดไฮโดรฟลูออริกหรือกรดไฮโดรคลอริกบนผิวไทเทเนียม จะเพิ่มค่าความทนแรงยึดระหว่างพอร์ซเลนกับโลหะไทเทเนียม (Cai et al., 2001) Troia ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของกรดและสารกัดผิวในการยึดติดของไทเทเนียมกับพอร์ซเลนที่ใช้เฉพาะสำหรับไทเทเนียม พบว่ากลุ่มที่ปรับสภาพผิวไทเทเนียมด้วย NaOH 50%-CuSO₄·5H₂O 10% และตามด้วยกรดมีค่ามากกว่ากลุ่มที่ใช้กรดเพียงอย่างเดียว และสรุปได้ว่าการ

ปรับสภาพผิวไทเทเนียมด้วยกรดก่อน ทำให้ค่าความทนแรงยึดระหว่างพอร์ซเลนกับไทเทเนียมเพิ่มขึ้น (Troia, Henriques, Mesquita, & Fragoso, 2008)

ในบางการศึกษาจะมีการศึกษาคุณภาพของสารยึด (bond) บนชั้นไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมเปรียบเทียบกับโลหะผสมทอง เมื่อนำมายึดกับพอร์ซเลนชนิดหลอมที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งผลที่ได้พบว่าสารยึดจะส่งเสริมให้เกิดการยึดติดระหว่างไทเทเนียมกับพอร์ซเลนดีขึ้น (Hussaini & Wazzan, 2005; Suansuwan & Swain, 2003; Yamada, Onizuka, Sumii, & Swain, 2004)

4. การวัดค่าการยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลน

เนื่องจากความซับซ้อนของกลไกการยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลน จึงได้มีการออกแบบการทดสอบที่จำเพาะเจาะจงมากขึ้น การประเมินค่าการยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลนอยู่บนพื้นฐานของการออกแบบที่เที่ยงตรง การแปลผลที่ถูกต้องและผลที่ได้มีความสัมพันธ์ทางคลินิก

การทดสอบต่าง ๆ ได้ถูกออกแบบและถูกเลือกโดยผู้วิจัยที่ศึกษาความทนแรงยึด (bond strength) ระหว่างโลหะกับพอร์ซเลน การทดสอบเหล่านี้ถูกจำแนกตามลักษณะของความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้น เช่น ความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือน (shear) แรงดึง (tension) การรวมกันระหว่างแรงเฉือนและแรงดึง แรงบิด (flexure) และแรงหมุน (torsion) (Hammad & Talic, 1996) อย่างไรก็ตามการทดสอบส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับความเค้นที่สะสมตามตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับพอร์ซเลน และผลจากความเค้นนี้ทำให้ประเมินค่าความทนแรงยึดอาจไม่ถูกต้อง ซึ่งความแตกต่างของค่าอิลาสติกโมดูลัสของโลหะและพอร์ซเลนจะมีผลต่อค่าความทนแรงยึดที่วัดได้ (Chung, Swain, & Mori, 1997)

การวัดค่าความทนแรงยึดของโลหะกับพอร์ซเลน โดยทั่วไปจะใช้การวัดในลักษณะแรงเฉือน (shear test) (Schmitz & Schulmeyer, 1975) โดยวัดความเค้นขณะเกิดความล้มเหลวของการยึด (bond failure) ซึ่งการทดสอบแรงเฉือนจะไม่ได้คำนึงถึงการกระจายความเค้นภายในชั้นของโลหะและพอร์ซเลนบริเวณที่เกิดความล้มเหลว แรงที่ทำให้เกิดการแตกจะรวมแรงที่ใช้ตัดโลหะด้วยทำให้การแปลผลผิดได้ (Tholey, Waddell, & Swain, 2007)

ทางเลือกสำหรับการศึกษาค่าการยึดติดระหว่างพื้นผิว 2 ชั้น ตามวิธีของ Charalambides et al. (1989) ได้มีการนำมาใช้ในงานทันตกรรมเพื่อประเมินค่า Interfacial fracture toughness ในรูปแบบของ Strain energy release rate (G value) ของการยึดติดระหว่างโลหะกับพอร์ซเลน (Suansuwan & Swain, 1999, 2003) ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถวัดค่าการยึดติดโดยไม่เกิดความเค้นสะสมที่จะทำให้เกิดการแปลผลผิดดังกล่าวข้างต้น มีการศึกษาการยึดติดระหว่างไทเทเนียมกับ

พอร์ชเลนที่มีการปรับสภาพผิวไทเทเนียม และได้รายงานในรูปแบบของ Strain energy release rate (G value) (Suansuwan & Swain, 1999, 2003; Tholey et al., 2007; Yamada et al., 2004) ในการศึกษาเหล่านี้มีการทำให้เกิดลักษณะรอยร้าวเริ่มต้น (pre-crack) ในชิ้นงานก่อนการทดสอบด้วยการกดคด 4 จุด (four-point bending test) ซึ่งจะช่วยให้รอยร้าวกว้างไปอย่างคงที่ระหว่างโลหะกับพอร์ชเลน ซึ่งจะเป็นการป้องกันการเกิดพลังงานสะสมในขณะที่มีแรงคด และป้องกันการแตกอย่างรวดเร็วจากจุดเริ่มต้นของการแตก

ถึงแม้ว่าไทเทเนียมจะมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่ดีและถูกนำมาใช้ในทางทันตกรรมประดิษฐ์มากขึ้น แต่การเกิดออกซิเดชันยังคงเป็นปัญหาหลักของไทเทเนียม กลไกการยึดระหว่างไทเทเนียมกับพอร์ชเลนยังคงซับซ้อน ซึ่งการศึกษานี้ได้ออกแบบให้มีการควบคุมการเกิดออกซิเดชันที่ผิวไทเทเนียม ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้ค่าการยึดติดระหว่างไทเทเนียมกับพอร์ชเลนดีขึ้น