

Khung hàm tháo lắp từng phần trong kỷ nguyên số: Tổng quan về vật liệu và kỹ thuật chế tác

Văn Hồng Phượng*, Phạm Nguyên Quân, Trịnh Minh Trí
Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng

TÓM TẮT

Đặt vấn đề: Khung hàm tháo lắp từng phần (RPD) bằng hợp kim cobalt-chromium (Co-Cr) truyền thống thường được chế tác bằng kỹ thuật đúc kim loại theo phương pháp dũi sáp. Quy trình này phụ thuộc nhiều vào thao tác thủ công và có thể gây sai số ảnh hưởng đến độ khít sát và đặc tính cơ học của khung phục hình. Sự phát triển của nha khoa số với công nghệ in kim loại 3D và phay CAD/CAM, cùng các vật liệu mới như titanium và polyetheretherketone (PEEK), đã mở ra các phương pháp chế tác thay thế. **Mục tiêu nghiên cứu:** Tổng hợp các bằng chứng về độ khít sát và đặc tính cơ học của khung RPD được chế tác bằng các quy trình truyền thống, lai và kỹ thuật số toàn phần với vật liệu Co-Cr, titanium và PEEK. **Đối tượng và phương pháp nghiên cứu:** Tổng quan mô tả dựa trên tìm kiếm các cơ sở dữ liệu PubMed, Scopus và Web of Science trong 10 năm gần đây; 15 nghiên cứu thử nghiệm lâm sàng, in vitro và tổng quan hệ thống được lựa chọn từ 327 bài báo ban đầu. **Kết quả:** Quy trình kỹ thuật số toàn phần cho độ khít sát tương đương đúc truyền thống, trong khi quy trình lai để tích lũy sai số. Co-Cr in 3D cho khả năng kháng mài mòn cao hơn; titanium và PEEK phay CAD/CAM có bề mặt nhẵn hơn, tuy nhiên móc PEEK có lực lưu giữ thấp hơn kim loại. **Kết luận:** Công nghệ chế tác kỹ thuật số và vật liệu mới cho thấy tiềm năng ứng dụng lâm sàng trong phục hình RPD, nhưng cần thêm nghiên cứu lâm sàng dài hạn.

Từ khóa: khung hàm tháo lắp từng phần, nha khoa kỹ thuật số, in 3D, CAD/CAM, PEEK

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mất răng từng phần là tình trạng phổ biến ở người trưởng thành và người cao tuổi, có thể ảnh hưởng đáng kể đến chức năng nhai, phát âm, thẩm mỹ và sự ổn định của khớp cắn. Trong nhiều trường hợp lâm sàng, hàm giả tháo lắp từng phần vẫn là phương pháp phục hình được sử dụng rộng rãi nhờ chi phí hợp lý, ít xâm lấn và khả năng áp dụng cho nhiều dạng mất răng khác nhau. Trong cấu trúc của phục hình này, khung hàm đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo sự ổn định của hàm giả, duy trì lực lưu giữ của tay móc và phân bố lực nhai hợp lý lên răng trụ cũng như mô nâng đỡ [1].

Trong nhiều thập kỷ qua, khung RPD chủ yếu được chế tác bằng kỹ thuật đúc kim loại truyền thống theo phương pháp dũi sáp, thường sử dụng hợp kim cobalt-chromium. Vật liệu này được xem là tiêu chuẩn vàng nhờ độ cứng cao, độ bền cơ học tốt và hiệu quả lâm sàng đã được chứng minh. Tuy nhiên, quy trình chế tác truyền thống bao gồm nhiều bước thủ công và phụ thuộc đáng kể vào tay nghề của kỹ thuật viên, từ đó có thể phát sinh sai số trong quá trình tạo mẫu sáp và đúc kim loại. Những sai số này có thể ảnh hưởng đến độ khít sát của khung hàm trên răng trụ và mô nâng đỡ, từ đó làm giảm sự ổn định của phục hình, ảnh hưởng đến

phân bố lực nhai và gây khó chịu cho bệnh nhân trong quá trình sử dụng [2, 3].

Sự phát triển nhanh chóng của nha khoa số trong những năm gần đây đã mở ra các phương pháp chế tác mới cho khung RPD. Các công nghệ sản xuất bồi đắp kim loại như nung chảy bằng laser chọn lọc (SLM), thiêu kết chọn lọc bằng laser (SLS), thiêu kết kim loại trực tiếp bằng laser (DMLS) cho phép chế tác trực tiếp khung kim loại từ dữ liệu thiết kế số [1]. Bên cạnh đó, các phương pháp thiết kế và sản xuất có sự hỗ trợ của máy tính (CAD/CAM) như kỹ thuật phay cũng được áp dụng cho một số vật liệu polymer hiệu suất cao như polyetheretherketone [4]. Nhờ mức độ tự động hóa cao và giảm số bước trung gian, các công nghệ này được kỳ vọng có thể cải thiện độ chính xác chế tác và tính lặp lại của sản phẩm [1, 5].

Bên cạnh độ khít sát, đặc tính cơ học của vật liệu và cấu trúc khung cũng là yếu tố quan trọng quyết định độ bền và hiệu quả lâm sàng của phục hình RPD. Các đặc tính như độ bền uốn, mô đun đàn hồi, khả năng kháng mài mòn và độ cứng bề mặt có thể bị ảnh hưởng bởi phương pháp chế tác cũng như vi cấu trúc vật liệu hình thành trong quá trình sản xuất. Một số nghiên cứu cho thấy các khung kim

Tác giả liên hệ: Văn Hồng Phượng

Email: phuongvh2@hiu.vn

loại được chế tác bằng công nghệ in 3D có thể tạo ra cấu trúc vi mô đặc khít và đồng nhất hơn so với phương pháp đúc truyền thống, từ đó có thể cải thiện một số đặc tính cơ học của vật liệu [6, 7]. Tuy nhiên, các kết quả nghiên cứu hiện nay vẫn còn chưa thống nhất.

Hiện nay, các vật liệu được sử dụng trong chế tác

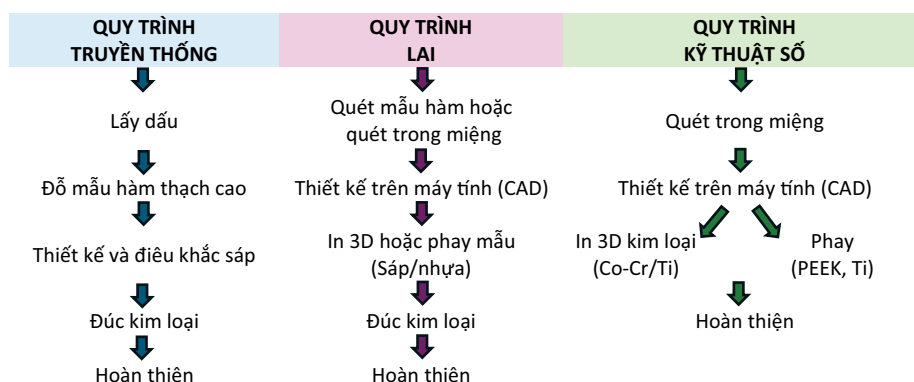
khung RPD bao gồm hợp kim Co-Cr, titanium và các polymer hiệu suất cao như PEEK, mỗi loại vật liệu đều có những ưu điểm và hạn chế riêng liên quan đến đặc tính cơ học, khả năng chế tác và hiệu quả lâm sàng. Các vật liệu và phương pháp chế tác khung hàm tháo lắp từng phần được tóm tắt trong Bảng 1.

Bảng 1. Tổng quan các vật liệu và phương pháp chế tác khung hàm tháo lắp từng phần

Vật liệu	Phương pháp chế tác	Ưu điểm nổi bật	Hạn chế
Hợp kim Co-Cr [1, 6, 7]	<ul style="list-style-type: none"> Đúc truyền thống In 3D kim loại (SLM/SLS) 	<ul style="list-style-type: none"> Độ cứng và độ bền cơ học cao, được xem là tiêu chuẩn vàng lâm sàng cho khung RPD. Công nghệ in kim loại tạo cấu trúc vi mô đặc khít và khả năng kháng mỏi cao hơn so với đúc. 	<ul style="list-style-type: none"> Thẩm mỹ hạn chế và trọng lượng tương đối lớn. Phương pháp đúc dễ xuất hiện lỗ xốp vi mô và sai số chế tác. Có thể giải phóng ion cobalt, gây lo ngại về độc tính sinh học.
Titanium [8 - 10]	<ul style="list-style-type: none"> Đúc truyền thống In 3D kim loại (SLM) Phay CAD/CAM 	<ul style="list-style-type: none"> Trọng lượng nhẹ và tương thích sinh học rất tốt. Không gây vị kim loại và ít gây dị ứng. Phay CAD/CAM tạo bề mặt nhẵn và ít lỗ rỗng vật liệu. 	<ul style="list-style-type: none"> Đúc titanium khó do phản ứng mạnh với oxy ở nhiệt độ cao, dễ hình thành lỗ xốp vi mô. Khung titanium in 3D thường có độ nhám bề mặt cao, cần đánh bóng nhiều.
PEEK [4, 11]	<ul style="list-style-type: none"> Ép nhựa Phay CAD/CAM In 3D đắp lớp 	<ul style="list-style-type: none"> Thẩm mỹ tốt (màu gần giống răng hoặc nướu). Tính trơ sinh học cao, không gây dị ứng kim loại. Mô-đun đàn hồi gần với xương, có khả năng hấp thu lực nhai. 	<ul style="list-style-type: none"> Lực lưu giữ của móc thấp hơn kim loại. Ép nhựa và in 3D đắp lớp có thể tạo lỗ xốp vi mô, làm giảm cơ tính. Độ đàn hồi cao có thể làm tăng tải lực lên niêm mạc nền hàm trong các trường hợp mất răng trụ phía sau.

Bên cạnh sự đa dạng về vật liệu, các quy trình chế tác khung RPD cũng có thể được thực hiện theo nhiều hướng khác nhau, bao gồm quy trình truyền thống, quy trình lai và quy trình kỹ thuật số hoàn toàn [1]. Trong quy trình truyền thống, khung kim loại được chế tác thông qua các bước tạo mẫu sáp

và đúc kim loại [12]. Trong khi đó, quy trình lai kết hợp giữa thiết kế kỹ thuật số và đúc kim loại, còn quy trình kỹ thuật số hoàn toàn cho phép chế tác khung trực tiếp bằng công nghệ in 3D kim loại hoặc phay vật liệu từ dữ liệu CAD [4, 8]. Sơ đồ so sánh các quy trình chế tác này được trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ so sánh các quy trình chế tác khung hàm tháo lắp từng phần: Quy trình truyền thống, quy trình lai và quy trình kỹ thuật số (tổng hợp từ Alqutaibi và cộng sự, 2025) [1]

Mặc dù nhiều nghiên cứu đã đánh giá các đặc tính riêng lẻ của từng vật liệu hoặc từng phương pháp chế tác khung RPD, các bằng chứng hiện có vẫn còn phân tán và chưa được tổng hợp một cách hệ thống [1]. Đặc biệt, các dữ liệu so sánh liên quan đến độ khít sát của khung hàm và các đặc tính cơ học của vật liệu giữa các công nghệ chế tác khác nhau vẫn còn hạn chế và chưa thống nhất trong y văn [1, 12, 13].

Vì vậy, nghiên cứu tổng quan này được thực hiện nhằm tổng hợp và cập nhật các bằng chứng khoa học hiện có về độ khít sát và đặc tính cơ học của khung hàm tháo lắp từng phần được chế tác bằng các công nghệ khác nhau, tập trung vào các vật liệu phổ biến hiện nay như hợp kim Co-Cr, titanium và PEEK. Kết quả của nghiên cứu nhằm cung cấp cơ sở khoa học cập nhật, góp phần hỗ trợ việc lựa chọn vật liệu và phương pháp chế tác khung RPD phù hợp trong thực hành phục hình nha khoa hiện đại.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết kế nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện dưới dạng tổng quan mô tả, tập trung tổng hợp và cập nhật các bằng chứng khoa học liên quan đến các loại vật liệu và công nghệ chế tác khung hàm tháo lắp từng phần.

2.2. Chiến lược tìm kiếm và sàng lọc

Dữ liệu được thu thập thông qua tìm kiếm trên các cơ sở dữ liệu điện tử PubMed, Scopus, Web of Science cho các bài báo xuất bản bằng tiếng Anh trong vòng 10 năm trở lại đây. Các từ khóa tìm kiếm bao gồm: *removable partial denture framework, digital dentistry, 3D printing, CAD/CAM, PEEK*. Các từ khóa được kết hợp bằng toán tử Boolean (AND, OR) để tối

ưu hóa kết quả tìm kiếm. Ngoài ra, danh mục tài liệu tham khảo của các bài tổng quan và các nghiên cứu được đưa vào phân tích cũng được rà soát thủ công nhằm xác định thêm các bài báo liên quan.

Tiêu chí lựa chọn bao gồm: (1) Các thử nghiệm lâm sàng, nghiên cứu *in vitro* và tổng quan hệ thống; (2) Các nghiên cứu so sánh về độ khít sát của RPD giữa quy trình kỹ thuật số và quy trình đúc truyền thống; (3) Các nghiên cứu so sánh đặc tính cơ học của RPD được chế tác bằng vật liệu Ti, PEEK so với Co-Cr.

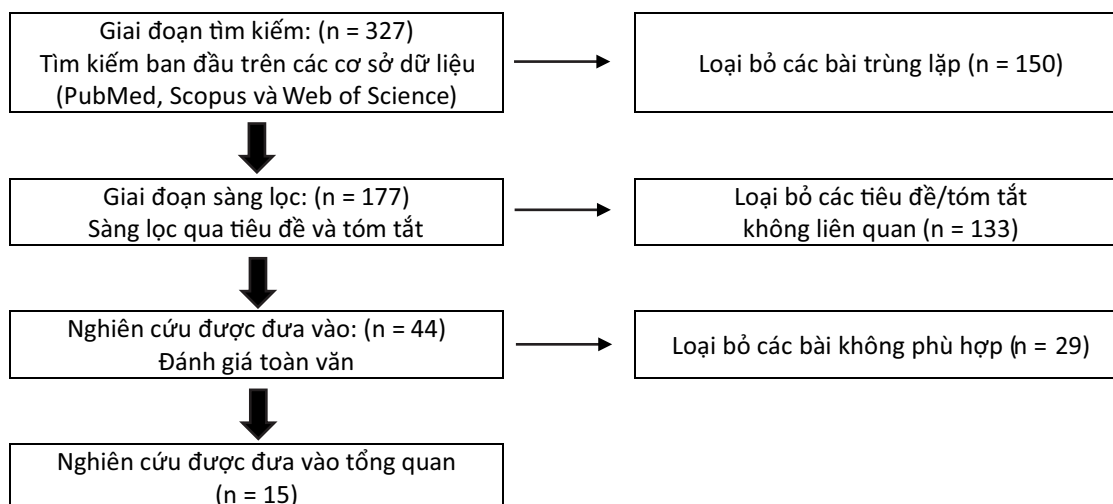
Các tiêu chí loại trừ bao gồm: (1) Các nghiên cứu trên động vật; (2) Báo cáo ca lâm sàng đơn lẻ; (3) Các bài báo không có toàn văn bằng tiếng Anh; (4) Các nghiên cứu không liên quan đến khung RPD hoặc không sử dụng Co-Cr/Ti/PEEK.

2.3. Kết quả tìm kiếm

Ban đầu xác định được 327 nghiên cứu từ ba cơ sở dữ liệu điện tử. Sau khi loại bỏ các bài trùng lặp, còn 177 nghiên cứu được đưa vào sàng lọc tiêu đề và tóm tắt. Sau bước sàng lọc này, 44 bài báo được lựa chọn để đánh giá toàn văn. Trong số đó, 15 nghiên cứu đáp ứng đầy đủ các tiêu chí chọn vào và được đưa vào tổng quan (Hình 2).

2.4. Đánh giá chất lượng nghiên cứu

Do tính không đồng nhất của các nghiên cứu được lựa chọn (bao gồm nghiên cứu lâm sàng và *in vitro*), nhóm tác giả áp dụng phương pháp đánh giá mô tả thay vì sử dụng một thang điểm định lượng duy nhất. Chất lượng nghiên cứu được xem xét dựa trên: (i) thiết kế nghiên cứu, (ii) cỡ mẫu và phương pháp đo lường và (iii) tính nhất quán giữa các kết quả. Các hạn chế phương pháp luận của từng nghiên cứu cũng được ghi nhận trong phần thảo luận.



Hình 2. Sơ đồ sàng lọc

3. KẾT QUẢ

Các giá trị trình bày trong các bảng được tổng hợp từ các nghiên cứu sử dụng thiết kế nghiên cứu và phương pháp đo khác nhau; do đó, các so sánh trong nghiên cứu này chỉ mang tính tương đối.

3.1. Độ khít sát của khung hàm tháo lắp từng phần theo các quy trình chế tác

Bảng 2 trình bày kết quả đo lường độ khít sát của khung RPD từ sáu nghiên cứu, bao gồm bốn nghiên cứu *in vivo* và hai nghiên cứu *in vitro*.

Về độ khít sát tổng thể, các thử nghiệm lâm sàng của Gan và cộng sự (2025) [12] và Zhu và cộng sự (2025) [14] không ghi nhận sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về độ hở giữa khung in kim loại bằng công nghệ SLM và khung đúc truyền thống. Tương tự, nghiên cứu *in vitro* của Rokhshad và cộng sự (2022) [13] cho thấy độ khít sát của khung chế tác bằng quy

trình lai ($109 \pm 21 \mu\text{m}$) tương đương với phương pháp đúc truyền thống ($103 \pm 18 \mu\text{m}$). Tuy nhiên, trong nghiên cứu *in vitro* của Soltanzadeh và cộng sự (2019) [3], độ hở của khung đúc truyền thống nhỏ hơn so với khung in 3D. Khi xét tại vị trí giải phẫu cụ thể, thử nghiệm lâm sàng của Pelletier và cộng sự (2024) [2] báo cáo phương pháp đúc truyền thống cho độ khít sát tốt hơn có ý nghĩa thống kê tại vị trí tựa mặt nhai so với khung in SLS ($P = 0.009$).

Khi so sánh giữa các quy trình ứng dụng kỹ thuật số, nghiên cứu lâm sàng chéo của Elgamal và cộng sự (2025) [5] cho thấy quy trình kỹ thuật số toàn phần có độ hở trung bình nhỏ hơn có ý nghĩa thống kê so với quy trình lai ($P = 0.0125$). Trong nghiên cứu của Gan và cộng sự (2025) [12], quy trình lai (in 3D mẫu resin sau đó đúc kim loại) ghi nhận độ hở trung bình lớn nhất ($396.7 \pm 136.9 \mu\text{m}$) so với hai phương pháp còn lại.

Bảng 2. Bảng so sánh độ khít sát của khung hàm tháo lắp từng phần chế tác bằng phương pháp kỹ thuật số và phương pháp truyền thống

Thiết kế nghiên cứu	Quy trình kỹ thuật số (μm)	Quy trình lai (μm)	Quy trình truyền thống (μm)	Phương pháp đo lường	Kết quả chính	Nghiên cứu (Tác giả, Năm)
Thử nghiệm lâm sàng	370.0 ± 111.3	396.7 ± 136.9	351.8 ± 117.4	Lót silicone và phân tích chồng lớp 3D bằng phần mềm Geomagic Studio	Không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa khung kỹ thuật số và truyền thống; quy trình lai có độ hở lớn nhất	Gan và cộng sự, 2025 [12]
	302.3*	–	274.8*	Lót silicone và phân tích chồng lớp 3D bằng phần mềm Geomagic Studio	Không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa khung in SLM và đúc truyền thống ($P = 0.172$)	Zhu và cộng sự, 2025 [14]
	101 ± 13	112 ± 18	–	Kỹ thuật 3 lần quét (quét trong miệng kết hợp quét khung) và phân tích chồng lớp 3D bằng Medit Compare	Quy trình kỹ thuật số cho độ hở nhỏ hơn đáng kể so với quy trình lai ($P = 0.0125$)	Elgamal và cộng sự, 2025 [5]
	398 ± 45	–	176 ± 41	Lót silicone, cắt lát cắt ngang và đo lường vi phẫu dưới kính hiển vi điện tử quét (SEM)	Phương pháp đúc truyền thống cho độ khít sát tốt hơn đáng kể tại vị trí tựa mặt nhai ($P = 0.009$)	Pelletier và cộng sự, 2024 [2]
Nghiên cứu <i>in vitro</i>	–	109 ± 21	103 ± 18	Quét 3D và phân tích chồng lớp bằng phần mềm Geomagic Control X	Độ khít sát tương đương nhau giữa quy trình lai và truyền thống	Rokhshad và cộng sự, 2022 [13]
	150 ± 13	–	27 ± 40	Quét 3D và phân tích chồng lớp bằng phần mềm Geomagic Control	Phương pháp đúc truyền thống cho thấy độ hở nhỏ hơn so với khung hàm in 3D	Soltanzadeh và cộng sự, 2019 [3]

Chú thích: Giá trị biểu thị độ hở trung bình (μm) giữa khung và mô nâng đỡ; Dữ liệu được trình bày dưới dạng trung bình \pm độ lệch chuẩn; (*): Dữ liệu được trình bày dưới dạng Trung vị, Dấu “–”: Không được đánh giá/báo cáo trong nghiên cứu

3.2. Đặc tính cơ học vật liệu và ảnh hưởng của công nghệ chế tác

Bảng 3. So sánh đặc tính cơ học của vật liệu khung hàm tháo lắp từng phần (RPD) theo phương pháp chế tác

Vật liệu	Đặc tính cơ học	In 3D	Phay CAD/CAM	Truyền thống	Ý nghĩa lâm sàng	Nguồn
Co-Cr	Độ bền kéo (MPa)	1,626 - 1,686 (SLS/DMLS)	-	~ 1462 (Đúc)	In 3D tạo cấu trúc đặc khít → tăng độ bền khung	Alageel và cộng sự, 2018 [6]
	Sức kháng mài (%)	89.6 - 91.1	-	25.4	Khung in kim loại chịu tải chu kỳ tốt hơn	Alageel và cộng sự, 2018 [6]
	Lực lưu giữ móc (N)	8.65 ± 0.65*	-	4.5 - 36.04	Móc đúc giữ mạnh ban đầu nhưng giảm nhanh; móc in ổn định hơn	Husseiny và cộng sự, 2026 [7]; Vaddamanu và cộng sự, 2023 [11]
	Độ biến dạng móc (mm)	0.06	-	0.16	In 3D giảm biến dạng vĩnh viễn của tay móc	Husseiny và cộng sự, 2026 [7]
Titanium	Độ bền kéo (MPa)	694.4 (SLM)	428.1	445.7	SLM cho độ bền kéo cao nhất	Wang và cộng sự, 2022 [8]
	Độ cứng (HV)	402	152.9	181.7	Độ cứng cao giúp tăng kháng biến dạng	Wang và cộng sự, 2022 [8]
	Độ nhám bề mặt (µm)	9.09 ± 0.81	0.83 ± 0.27	2.49 - 3.10	Phay cho bề mặt nhẵn nhất; khung in cần đánh bóng	Tan và cộng sự, 2019 [9]
	Độ rỗ xốp	Thấp	Không phát hiện	Cao	Khung đúc dễ xuất hiện lỗ xốp → giảm độ bền	Maruo và cộng sự, 2022 [10]
PEEK	Độ bền uốn (MPa)	140.9 ± 1.6 (FDM)	158.7 ± 1.4	148.0 ± 4.1	Phay CAD/CAM cho độ bền uốn cao và đồng nhất	Guo và cộng sự, 2022 [4]
	Độ bền nén (MPa)	141.7 ± 6.6	147.9 ± 1.8	119.0 ± 15.4	Ép nhựa có thể tạo bọt khí → giảm cơ tính	Guo và cộng sự, 2022 [4]
	Lực lưu giữ móc (N)	-	2.71 - 10.48	~ 4.53**	Móc PEEK phay duy trì lực giữ ổn định	El-Baz và cộng sự, 2020 [15]; Vaddamanu và cộng sự, 2023 [11]

Chú thích bảng:

*Lực lưu giữ sau thử nghiệm mài

**Giá trị lực lưu giữ sau mô phỏng 24 tháng tháo lắp chu kỳ

Bảng 3 trình bày sự khác biệt về các đặc tính cơ học của ba loại vật liệu khung hàm tháo lắp từng phần (RPD) gồm hợp kim Co-Cr, titanium và PEEK khi được chế tác bằng các quy trình khác nhau. Các kết quả chính bao gồm:

Đối với hợp kim Co-Cr, nghiên cứu của Alageel và cộng sự (2018) [6] ghi nhận các khung chế tác bằng công nghệ in kim loại bằng laser (SLS/DMLS) đạt độ bền kéo trong khoảng 1626 - 1686 MPa và sức kháng mỏi 89.6 - 91.1%, trong khi các mẫu đúc truyền thống ghi nhận thông số này chỉ ở khoảng 1,462 MPa và sức kháng mỏi 25.4%. Về đặc tính lưu giữ của tay móc, các thử nghiệm của Husseiny và cộng sự (2026) [7] và Vaddamanu và cộng sự (2023) [11] cho thấy móc đúc có lực lưu giữ ban đầu cao (lên đến 36.04 N) nhưng đồng thời ghi nhận mức độ biến dạng vĩnh viễn lớn hơn (0.16 mm). Ngược lại, móc chế tác bằng công nghệ in kim loại (SLM) duy trì lực lưu giữ ổn định (8.65 ± 0.65 N) với mức biến dạng thấp hơn (0.06 mm).

Đối với titanium, đánh giá của Wang và cộng sự (2022) [8] cho thấy các khung chế tác bằng công nghệ SLM đạt độ bền kéo 694.4 MPa và độ cứng 402 HV. Trong khi đó, nghiên cứu của Tan và cộng sự (2019) [9] ghi nhận khung titanium chế tác bằng phay CAD/CAM có độ nhám bề mặt thấp nhất (0.83 ± 0.27 μm), trong khi bề mặt của khung in 3D có độ nhám cao hơn (9.09 ± 0.81 μm). Ngoài ra, Maruo và cộng sự (2022) [10] báo cáo rằng không phát hiện rõ xoắn trên các khung titanium phay cắt, trong khi các mẫu đúc truyền thống ghi nhận sự hiện diện của xoắn vi mô.

Đối với PEEK, nghiên cứu của Guo và cộng sự (2022) [4] cho thấy các mẫu chế tác bằng phay CAD/CAM đạt độ bền uốn (158.7 ± 1.4 MPa) và độ bền nén (147.9 ± 1.8 MPa) cao hơn so với các phương pháp chế tác khác. Công nghệ in 3D dạng đắp lớp (FDM) ghi nhận độ bền uốn 140.9 ± 1.6 MPa, trong khi phương pháp ép nhựa truyền thống ghi nhận độ bền nén thấp hơn (119.0 ± 15.4 MPa). Về đặc tính lưu giữ của tay móc PEEK, Vaddamanu và cộng sự (2023) [11] báo cáo lực lưu giữ của móc phay CAD/CAM dao động từ 2.71 đến 10.48 N. Trong khi đó, El-Baz và cộng sự (2020) [15] ghi nhận lực lưu giữ của móc ép nhựa giảm xuống khoảng 4.53 N sau mô phỏng chu kỳ tháo lắp tương đương 24 tháng sử dụng

4. BÀN LUẬN

Lưu ý về tính không đồng nhất của dữ liệu: Trước

khi phân tích chi tiết, cần lưu ý rằng có sự không đồng nhất đáng kể giữa các nghiên cứu được tổng hợp trong bài viết này [1]. Sự khác biệt nằm ở:

1. Phương pháp đo lường: Các nghiên cứu sử dụng nhiều kỹ thuật khác nhau để đánh giá độ khít sát, từ kỹ thuật lát silicone truyền thống, kính hiển vi quang học đến các phương pháp kỹ thuật số hiện đại như quét 3D và chồng hình.
2. Thiết kế mẫu thử: Một số nghiên cứu đánh giá trên móc đơn lẻ, trong khi số khác đánh giá trên khung hàm toàn bộ hoặc các thiết kế Kennedy khác nhau (ngắn so với dài).
3. Thông số chế tác: Đối với nhóm in 3D (SLM/SLS), các thông số như độ dày lớp in (30 - 50 μm), công suất laser và đặc biệt là định hướng in ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) thay đổi tùy theo nghiên cứu, ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và cơ tính sản phẩm.

Do đó, các số liệu so sánh dưới đây nên được diễn giải như những xu hướng tổng quát về hiệu suất của vật liệu và kỹ thuật, thay vì các khẳng định tuyệt đối về sự vượt trội định lượng.

4.1. Độ khít sát của khung hàm tháo lắp từng phần theo các quy trình chế tác

Độ khít sát của khung hàm tháo lắp từng phần là yếu tố quan trọng quyết định sự ổn định sinh cơ học của phục hình, góp phần hạn chế sang chấn lên răng trụ và mô nâng đỡ. Tổng hợp các nghiên cứu trong y văn cho thấy độ hở của khung RPD được chế tác bằng các phương pháp khác nhau phần lớn vẫn nằm trong ngưỡng chấp nhận lâm sàng (khoảng 50 - 311 μm), mặc dù tồn tại sự khác biệt nhất định giữa các quy trình [3, 12].

Các nghiên cứu gần đây cho thấy công nghệ chế tác kỹ thuật số toàn phần, đặc biệt là in kim loại trực tiếp bằng laser (SLM), có thể đạt độ khít sát tương đương phương pháp đúc truyền thống. Gan và cộng sự (2025) [12] và Zhu và cộng sự (2025) [14] ghi nhận không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về độ khít sát tổng thể giữa khung in SLM và khung đúc Co-Cr. Điều này cho thấy công nghệ in kim loại hiện nay đã đạt độ chính xác đủ cao để ứng dụng lâm sàng. Hơn nữa, những sai lệch nhỏ ở mức vài chục micromet thường không ảnh hưởng đáng kể trên lâm sàng, do khả năng đàn hồi sinh lý của niêm mạc có thể bù trừ cho các khoảng hở vi mô [5, 12].

Tuy nhiên, một số nghiên cứu vẫn ghi nhận khung đúc truyền thống có độ khít sát tốt hơn tại các vị trí giải phẫu quan trọng, như tựa mặt nhai hoặc thanh nối chính [2, 3]. Sự khác biệt này có thể liên quan đến các sai số nội tại của công nghệ in bồi đắp, bao gồm hiện tượng co ngót nhiệt và biến dạng trong quá trình làm nguội kim loại sau khi nung chảy [1, 12].

Một điểm đáng chú ý khác là quy trình lai - kết hợp giữa kỹ thuật số và quy trình đúc truyền thống - thường cho độ khít sát kém hơn so với hai phương pháp còn lại. Elgamal và cộng sự (2025) [5] và Gan và cộng sự (2025) [12] cho thấy quy trình này dễ xảy ra hiện tượng tích lũy sai số qua nhiều bước trung gian, bao gồm in mẫu resin/sáp, giã vỡ vật liệu bao đúc và co ngót kim loại khi đúc. Do đó, nếu áp dụng công nghệ số trong chế tác khung RPD, việc sử dụng quy trình kỹ thuật số toàn phần (SLM hoặc CAD/CAM) có thể mang lại độ chính xác cao và ổn định hơn [1].

4.2. Đặc tính cơ học của vật liệu và ảnh hưởng của công nghệ chế tác

Đặc tính cơ học của vật liệu, bao gồm độ bền kéo, sức kháng mỏi, lực lưu giữ và độ biến dạng, là những yếu tố quyết định đến tuổi thọ và khả năng chịu tải của khung RPD trong môi trường miệng. Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy công nghệ chế tác có ảnh hưởng đáng kể đến cấu trúc vi mô của vật liệu, từ đó làm thay đổi hành vi cơ học của khung phục hình [1].

Đối với hợp kim Co-Cr, công nghệ in kim loại bằng laser (SLM/SLS) cho thấy nhiều ưu điểm so với phương pháp đúc. Theo Alageel và cộng sự (2018) [6], quá trình nung chảy bột kim loại bằng laser tạo ra cấu trúc vi mô hạt mịn và đặc khít, giúp khung in 3D đạt độ bền kéo và sức kháng mỏi cao hơn so với khung đúc truyền thống. Khi đánh giá hiệu quả của tay móc, Hussein và cộng sự (2026) [7] ghi nhận móc Co-Cr đúc có xu hướng giảm lực lưu giữ và xuất hiện biến dạng vĩnh viễn lớn hơn (0.16 mm) sau nhiều chu kỳ tháo lắp, trong khi móc in SLM duy trì lực lưu giữ ổn định hơn và có độ biến dạng thấp hơn (0.06 mm).

Đối với titanium, công nghệ SLM cho độ bền kéo và độ cứng cao nhất so với các phương pháp chế tác khác [8]. Tuy nhiên, nhược điểm của khung titanium in 3D là độ nhám bề mặt cao, do các hạt bột kim loại thiêu kết không hoàn toàn bám trên

bề mặt [9]. Ngược lại, phay CAD/CAM từ phôi titanium đặc tạo ra bề mặt nhẵn hơn đáng kể và ít khuyết tật vật liệu. Ngoài ra, do titanium phản ứng mạnh với oxy ở nhiệt độ cao, quy trình đúc truyền thống thường tạo ra nhiều lỗ rỗ xốp, làm suy giảm cơ tính của vật liệu [10].

Đối với PEEK, phương pháp chế tác đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định cơ tính của vật liệu. Theo Guo và cộng sự (2022) [4], PEEK phay CAD/CAM từ phôi công nghiệp cho độ bền uốn và độ bền nén cao nhất, trong khi phương pháp ép nhựa hoặc in 3D đắp lớp có thể tạo ra khuyết tật vi cấu trúc làm giảm cơ tính. Do đặc tính đàn hồi của polymer, lực lưu giữ của tay móc PEEK thường thấp hơn kim loại, tuy nhiên vẫn nằm trong ngưỡng chức năng lâm sàng khoảng 3 - 7.5 N [11, 15]. Để đảm bảo hiệu quả lưu giữ, nhiều tác giả khuyến cáo thiết kế móc PEEK dày hơn và đặt ở vùng lẹm sâu hơn so với móc kim loại [11].

4.3. Khuyến nghị lâm sàng trong lựa chọn vật liệu và công nghệ chế tác

Các bằng chứng hiện có cho thấy công nghệ chế tác kỹ thuật số có tiềm năng cải thiện cả độ khít sát của khung RPD và đặc tính cơ học của vật liệu, từ đó hỗ trợ lựa chọn phương pháp điều trị phù hợp cho từng tình huống lâm sàng [1]. Nhiều nghiên cứu ghi nhận khung hợp kim Co-Cr chế tác bằng công nghệ in 3D SLM có độ chính xác hình học và sức kháng mỏi cao hơn so với phương pháp đúc truyền thống [6, 7]. Trong khi đó, titanium phay cắt CAD/CAM được đánh giá cao nhờ tính tương thích sinh học và khả năng hạn chế khuyết tật vi cấu trúc của vật liệu đúc [9, 10]. Ngoài kim loại, PEEK phay cắt CAD/CAM mang lại lợi thế thẩm mỹ và mô-đun đàn hồi thấp, tuy nhiên cần thận trọng khi chỉ định ở các trường hợp mất răng trụ phía sau do nguy cơ tăng áp lực lên niêm mạc sống hàm [4, 11]. Do đó, việc lựa chọn vật liệu và công nghệ chế tác cần dựa trên đặc điểm sinh cơ học của từng bệnh nhân. Các nghiên cứu lâm sàng dài hạn vẫn cần thiết để xác nhận hiệu quả của các quy trình chế tác kỹ thuật số trong phục hình tháo lắp [2, 14].

4.4. Hạn chế và hướng nghiên cứu tương lai

Mặc dù nhiều nghiên cứu đã đánh giá độ khít sát và đặc tính cơ học của các vật liệu và công nghệ chế tác khác nhau, phần lớn bằng chứng hiện nay vẫn dựa trên các nghiên cứu *in vitro*. Những nghiên cứu

cứu này không thể tái tạo hoàn toàn môi trường miệng phức tạp, bao gồm lực nhai thay đổi, điều kiện ẩm, mài mòn và các yếu tố sinh học khác.

Ngoài ra, sự khác biệt về thiết kế nghiên cứu, phương pháp đo lường và tiêu chí đánh giá giữa các nghiên cứu cũng gây khó khăn cho việc so sánh trực tiếp kết quả. Do đó, các nghiên cứu lâm sàng với thời gian theo dõi dài hạn vẫn cần thiết để đánh giá chính xác hiệu quả của các công nghệ chế tác kỹ thuật số trong phục hình RPD.

5. KẾT LUẬN

Trong giới hạn của bài tổng quan này, dựa trên các bằng chứng hiện có, có thể rút ra một số nhận định chính sau:

Về độ khít sát và quy trình chế tác: Các quy trình chế tác kỹ thuật số toàn phần, đặc biệt là in kim loại trực tiếp bằng laser (SLM/SLS) và phay CAD/CAM, cho thấy khả năng đạt độ khít sát trong giới hạn chấp nhận lâm sàng và trong nhiều nghiên cứu cho kết quả tương đương với phương pháp đúc truyền thống. Ngược lại, các quy trình lai kết hợp in mẫu nhựa và đúc kim loại có xu hướng làm tăng sự tích lũy sai số trong các bước trung gian.

Về vật liệu và đặc tính cơ học: Công nghệ chế tác có ảnh hưởng đáng kể đến cấu trúc vi mô và đặc tính cơ học của vật liệu. Một số nghiên cứu cho thấy khung hợp kim Co-Cr chế tác bằng công nghệ in kim loại có khả năng kháng mỏi và duy trì lực lưu giữ của tay móc cao hơn so với phương pháp đúc. Đối với titanium và PEEK, phương pháp phay CAD/CAM nguyên khối thường giúp hạn chế khuyết tật vật liệu và cải thiện chất lượng bề mặt.

Về thiết kế và chỉ định lâm sàng: Sự khác biệt về mô-đun đàn hồi giữa các vật liệu đòi hỏi phải điều chỉnh thiết kế khung phục hình phù hợp. Đối với PEEK, do mô-đun đàn hồi thấp hơn kim loại, thiết kế tay móc cần được điều chỉnh nhằm đảm bảo lực lưu giữ ổn định và phân bố lực hợp lý trên mô nâng đỡ.

Hướng nghiên cứu tương lai: Phần lớn các bằng chứng hiện nay vẫn dựa trên nghiên cứu *in vitro* hoặc các nghiên cứu lâm sàng với thời gian theo dõi ngắn. Do đó, các thử nghiệm lâm sàng ngẫu nhiên có đối chứng với thời gian theo dõi dài hạn vẫn cần thiết để đánh giá toàn diện hiệu quả và độ bền của các vật liệu cũng như công nghệ chế tác mới trong phục hình tháo lắp từng phần.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. Y. Alqutaibi, R. S. Al-Gabri, A. S. Al-Zaghruri, ..., M. A. Alghauli, "Clinical performance, accuracy, and physical-mechanical properties of 3D-printed removable partial denture metal frameworks compared with conventionally and partially digitally produced frameworks: A systematic review," *Journal of Prosthodontic Research*, 2025.

[2] S. Pelletier, A. Pelletier, and G. Al Dika, "Adaptation of removable partial denture rest seats in prostheses made with selective laser sintering or casting techniques: A randomized clinical trial," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2024.

[3] P. Soltanzadeh, M. S. Suprono, M. T. Kattadiyil, C. Goodacre, and W. Gregorius, "An in vitro investigation of accuracy and fit of conventional and CAD/CAM removable partial denture frameworks," *Journal of Prosthodontics*, vol. 28, no. 5, pp. 547-555, 2019.

[4] F. Guo, S. Huang, N. Liu, ..., C. Liu, "Evaluation of

the mechanical properties and fit of 3D-printed polyetheretherketone removable partial dentures," *Dental Materials Journal*, vol. 41, no. 6, pp. 816-823, 2022.

[5] M. Elgamal, A. M. Ibrahim, B. T. Fadel, and N. A. Ragheb, "Accuracy assessment of removable partial denture frameworks fabricated by selective laser melting using two different workflows: A cross-over clinical study," *BMC Oral Health*, vol. 25, art. no. 824, 2025.

[6] O. Alageel, M. N. Abdallah, A. Alshegri, ..., F. Tamimi, "Removable partial denture alloys processed by laser-sintering technique," *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, vol. 106, no. 3, pp. 1174-1185, 2018.

[7] E. Husseiny, R. A. F. Youssef, N. Eltamaly, D. Rokaya and S. Z. Mohamed, "Comparison of retentive force and deformation of selective laser melting and conventional cobalt-chromium clasps

of removable partial denture," *BMC Oral Health*, vol. 26, art. no. 361, 2026.

[8] Y. Wang, Y. Guo, Y. Jin, Y. Wang and C. Wang, "Mechanical properties, corrosion resistance, and anti-adherence characterization of pure titanium fabricated by casting, milling, and selective laser melting," *Journal of Biomedical Materials Research Part B*, vol. 110, pp. 1523 - 1534, 2022.

[9] F.-B. Tan, J.-L. Song, C. Wang, Y.-B. Fan, and H.-W. Dai, "Titanium clasp fabricated by selective laser melting, CNC milling, and conventional casting: A comparative in vitro study," *Journal of Prosthodontic Research*, vol. 63, no. 1, pp. 58 - 65, 2019.

[10] R. Maruo, H. Shimpō, K. Kimoto, ..., C. Ohkubo "Fitness accuracy and retentive forces of milled titanium clasp," *Dental Materials Journal*, vol. 41, no. 3, pp. 414 - 420, 2022.

[11] S. K. Vaddamanu, F. H. Alhamoudi, S. Chaturvedi, ..., A. E. Elmahdi, "Retentive forces and deformation of fitting surface in RPD clasp made of polyether-ether-ketone (PEEK)," *Polymers*, vol. 15, no. 4, art. no. 956, 2023.

[12] N. Gan, M. Yao, Y. Ruan, C. Wang, ..., T. Jiao, "Adaptation of maxillary removable partial denture frameworks fabricated with a direct digital workflow: A randomized crossover clinical trial," *Journal of Dentistry*, vol. 154, art. no. 105588, 2025.

[13] R. Rokhshad, A. M. Tehrani, R. Nahidi, and A. Zarbakhsh, "Fit of removable partial denture frameworks fabricated from 3D-printed patterns versus the conventional method: An in vitro comparison," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 131, no. 6, pp. 1144 - 1149, 2024.

[14] C. Zhu, M. Yao, C. Wang, ..., T. Jiao, "Clinical efficacy of maxillary digital removable partial dentures based on direct intraoral scanning and selective laser melting technology: a double-blind randomized controlled crossover clinical trial," *Journal of Dentistry*, vol. 153, art. no. 105542, 2025.

[15] R. El-Baz, M. Fayad, M. Abas, ..., M. A. Helal, "Comparative study of some mechanical properties of cobalt chromium and polyether ether ketone thermoplastic removable partial denture clasps: an In-vitro Study," *Brazilian Dental Science*, vol. 23, no. 3, 2020.

Removable partial denture frameworks in the digital era: A review of materials and manufacturing techniques

Van Hong Phuong, Pham Nguyen Quan, Trinh Minh Tri

ABSTRACT

Background: Conventional removable partial denture (RPD) frameworks made of cobalt-chromium (Co-Cr) alloys are typically fabricated using the lost-wax casting technique. This process relies heavily on manual procedures and may introduce inaccuracies that affect the fit and mechanical properties of the prosthetic framework. Advances in digital dentistry, including metal 3D printing and CAD/CAM milling, together with emerging materials such as titanium and polyetheretherketone (PEEK), have introduced alternative fabrication approaches. Objectives: To summarize current evidence regarding the fit accuracy and mechanical properties of RPD frameworks fabricated using conventional, hybrid, and fully digital workflows with materials including Co-Cr, titanium, and PEEK. Materials and methods: A descriptive narrative review was conducted by searching the PubMed, Scopus, and Web of Science databases over the past 10 years. Fifteen studies, including in vivo, in vitro, and systematic reviews, were selected from an initial pool of 327 articles for analysis. Results: Fully digital workflows demonstrated fit accuracy comparable to conventional casting, whereas hybrid workflows tended to accumulate errors. Three-dimensionally printed Co-Cr frameworks showed improved fatigue resistance, while CAD/CAM-milled titanium and PEEK frameworks exhibited smoother surfaces. However, PEEK clasps generally demonstrated lower retentive forces than metal clasps. Conclusion: Digital fabrication technologies and

alternative materials show promising potential for clinical application in RPD prosthodontics. Nevertheless, further long-term clinical studies are required.

Keywords: *removable partial denture framework, digital dentistry, 3D printing, CAD/CAM, PEEK*

Received: 16/01/2026

Revised: 12/3/2026

Accepted for publication: 22/3/2026