

PREDICTION OF HEATING TIME OF CLEAR SINGLE-LAYER TPU ORTHODONTIC ALIGNER TRAYS: AN IN VITRO STUDY

Tran Thi Bich Van*

*Faculty of Dentistry, University of Medicine and Pharmacy of Ho Chi Minh city - 217 Hong Bang, Cho Lon ward,
Ho Chi Minh city, Vietnam*

Received: 19/03/2026

Revised: 20/04/2026; Accepted: 05/06/2026

ABSTRACT

Objective: To evaluate the variation in heating time of single-layer thermoplastic polyurethane (TPU) sheets and to develop a predictive model describing the trend of heating time across consecutive thermoforming cycles.

Methods: An in vitro study was conducted on 140 single-layer TPU sheets (Maxflex, 0.76 mm thickness) thermoformed using a Druformat Scan machine (Dreve, Germany). 7 independent experimental sessions were performed, each consisting of 20 consecutive thermoforming cycles starting from a cold-start condition. Heating time was recorded when the sheet reached a standard sagging depth of 16 mm, measured using a laser monitoring system. Data were analyzed using a non-linear mixed-effects model, Student's t-test, and Bonferroni multiple comparisons.

Results: The heating time decreased from 113.86 ± 1.57 seconds in the first thermoforming cycle to approximately 69-70 seconds from the 12th cycle onward. Statistically significant differences were observed between cycles 1-11 ($p < 0.05$), after which the system reached a thermal steady state. The observed heating time was significantly longer than the manufacturer's recommended 30 seconds ($p < 0.001$). The non-linear mixed-effects model demonstrated an exponential decay pattern with an asymptotic value of 66.35 seconds ($R^2 = 0.97$).

Conclusions: The heating time of single-layer TPU depends on the number of thermoforming cycles and stabilizes after approximately the 12th cycle. The actual heating time was substantially longer than the manufacturer's recommendation, indicating the need for calibration and standardization of heating parameters under real operating conditions to ensure the accuracy of clear orthodontic aligners.

Keywords: Clear orthodontic aligners, thermoforming, heating time, single-layer TPU, nonlinear mixed-effects model.

*Corresponding author

Email: ttbvan@ump.edu.vn **Phone:** (+84) 918737697 **DOI:** 10.52163/yhc.v67iCD6.5368

DỰ ĐOÁN THỜI GIAN GIA NHIỆT CỦA KHAY CHỈNH NHA TRONG SUỐT TPU ĐƠN LỚP: NGHIÊN CỨU IN VITRO

Trần Thị Bích Vân*

Khoa Răng Hàm Mặt, Đại học Y Dược thành phố Hồ Chí Minh - 217 Hồng Bàng, phường Chợ Lớn, thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ngày nhận bài: 19/03/2026

Ngày chỉnh sửa: 20/04/2026; Ngày duyệt đăng: 05/06/2026

TÓM TẮT

Mục tiêu: Đánh giá sự biến thiên thời gian gia nhiệt của tấm nhựa nhiệt dẻo thermoplastic polyurethane (TPU) đơn lớp và xây dựng mô hình dự đoán xu hướng thay đổi trong các chu kỳ ép liên tiếp.

Phương pháp: Nghiên cứu *in vitro* được thực hiện trên 140 tấm TPU đơn lớp Maxflex dày 0,76 mm, ép bằng máy Druformat Scan (Dreve, Đức). 7 đợt thí nghiệm độc lập được tiến hành, mỗi đợt gồm 20 lần ép liên tiếp bắt đầu từ trạng thái khởi động nguội. Thời gian gia nhiệt được ghi nhận tại thời điểm tấm nhựa đạt độ võng chuẩn 16 mm, đo bằng hệ thống laser. Dữ liệu được phân tích bằng mô hình hỗn hợp phi tuyến, kiểm định t và phép so sánh Bonferroni.

Kết quả: Thời gian gia nhiệt giảm từ $113,86 \pm 1,57$ giây ở lần ép đầu tiên xuống khoảng 69-70 giây từ lần ép thứ 12 trở đi. Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các lần ép từ 1 đến 11 ($p < 0,05$), sau đó hệ thống đạt trạng thái ổn định nhiệt. Thời gian gia nhiệt thực tế cao hơn có ý nghĩa so với mức 30 giây theo khuyến cáo của nhà sản xuất ($p < 0,001$). Mô hình hỗn hợp phi tuyến cho thấy thời gian gia nhiệt giảm theo hàm mũ và tiệm cận tại khoảng 66,35 giây ($R^2 = 0,97$).

Kết luận: Thời gian gia nhiệt của TPU đơn lớp phụ thuộc vào số chu kỳ ép và có xu hướng ổn định từ khoảng lần ép thứ 12. Giá trị thực tế cao hơn đáng kể so với khuyến cáo của nhà sản xuất, cho thấy cần hiệu chuẩn và chuẩn hóa thông số gia nhiệt theo điều kiện vận hành thực tế nhằm bảo đảm độ chính xác của khay chỉnh nha trong suốt.

Từ khóa: Khay chỉnh nha trong suốt, ép nhiệt, thời gian gia nhiệt, TPU đơn lớp, mô hình hỗn hợp phi tuyến.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khay chỉnh nha trong suốt ngày càng được sử dụng rộng rãi trong điều trị chỉnh nha nhờ ưu điểm về tính thẩm mỹ và sự thoải mái cho bệnh nhân. Quá trình chế tạo khay thường dựa trên kỹ thuật ép nhiệt các tấm nhựa nhiệt dẻo lên mẫu hàm. Trong số các vật liệu được sử dụng, thermoplastic polyurethane (TPU) đơn lớp là một trong những vật liệu phổ biến nhờ đặc tính quang học tốt, độ bền cơ học ổn định và khả năng tạo hình nhiệt thuận lợi. Chất lượng và độ chính xác hình học của khay chỉnh nha phụ thuộc đáng kể vào quá trình ép nhiệt, đặc biệt là giai đoạn gia nhiệt khi tấm nhựa được làm mềm trước khi ép áp lực lên mẫu hàm [1-5].

Trong thực hành lâm sàng và labo chỉnh nha, thời gian gia nhiệt thường được thiết lập dựa trên thông số khuyến cáo của nhà sản xuất. Tuy nhiên, trong điều kiện vận hành thực tế, thời gian gia nhiệt có thể thay đổi tùy thuộc vào trạng thái nhiệt của thiết bị và số chu kỳ ép liên tiếp. Gia nhiệt quá mức có thể làm giảm độ dày của khay, trong khi gia nhiệt không đủ có thể làm giảm độ mềm dẻo của vật liệu và ảnh hưởng đến khả năng khít sát của khay trên răng.

Những sai lệch này có thể làm giảm độ chính xác của khay và ảnh hưởng đến hiệu quả di chuyển răng trên lâm sàng.

Các nghiên cứu về ép nhiệt vật liệu polymer cho thấy điều kiện gia nhiệt có thể thay đổi đáng kể giữa các chu kỳ ép liên tiếp, đặc biệt khi thiết bị chuyển từ trạng thái khởi động nguội sang trạng thái vận hành ổn định [6-7]. Tuy nhiên, các bằng chứng định lượng về sự biến thiên của thời gian gia nhiệt trong sản xuất khay chỉnh nha trong suốt vẫn còn hạn chế, đặc biệt là về xu hướng thay đổi theo số chu kỳ ép và thời điểm hệ thống đạt trạng thái cân bằng nhiệt [8-9].

Do đó, nghiên cứu *in vitro* này được thực hiện nhằm đánh giá sự biến thiên của thời gian gia nhiệt của vật liệu TPU đơn lớp trong các chu kỳ ép nhiệt liên tiếp và xây dựng mô hình dự đoán xu hướng thay đổi của thời gian gia nhiệt theo số lần ép.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Tổng cộng 140 tấm nhựa nhiệt dẻo MF có độ dày 0,76 mm được sử dụng trong nghiên cứu. MF là vật liệu chỉnh nha

*Tác giả liên hệ

Email: ttbvan@ump.edu.vn Điện thoại: (+84) 918737697 DOI: 10.52163/yhc.v67iCD6.5368

trong suốt thuộc nhóm PET-G. Theo khuyến cáo của nhà sản xuất, tấm ép MF thường được gia nhiệt khoảng 30 giây trong quá trình ép nhiệt.

2.2. Thiết bị và quy trình ép nhiệt

Máy ép áp lực sử dụng trong nghiên cứu là Druformat Scan (Dreve, Đức). Thiết bị được vận hành theo chương trình tiêu chuẩn F1 của nhà sản xuất, với thời gian gia nhiệt tối đa 4 phút và thời gian làm nguội 1 phút 30 giây cho mỗi chu kỳ.

Mẫu hàm trên chuẩn hóa được chế tạo bằng công nghệ in 3D và sử dụng làm khuôn cho quá trình ép khay. Trước mỗi thí nghiệm, mẫu hàm được làm sạch và đặt ở vị trí trung tâm của bàn ép, với mặt phẳng cắn song song với mặt phẳng tham chiếu ngang của máy nhằm đảm bảo hình học ép được chuẩn hóa.

Điểm kết thúc gia nhiệt được xác định bằng hệ thống đo độ võng của miếng ép bằng hệ thống cân bằng laser. Dựa trên các thử nghiệm thăm dò ban đầu và các nghiên cứu về khay ép nhiệt trước đây, nghiên cứu chọn độ võng là 16 mm tại trung tâm tấm ép, được cho là lúc tấm ép đạt mức hóa dẻo thích hợp [9].

Thời gian gia nhiệt được ghi nhận bằng đồng hồ bấm giờ kỹ thuật số với độ chính xác ± 1 giây khi độ võng đạt 16 mm.

Nghiên cứu gồm 7 đợt ép độc lập, mỗi đợt thực hiện 20 lần ép liên tiếp bắt đầu từ trạng thái khởi động nguội của thiết bị. Sau khi ép, khay được làm nguội trong 1 phút trước khi tháo ra và tiến hành chu kỳ tiếp theo.

Để giảm ảnh hưởng của sự tích tụ nhiệt giữa các đợt thí nghiệm, thiết bị được làm nguội hoàn toàn sau mỗi đợt 20 lần ép, thời gian nghỉ tối thiểu giữa các đợt ép là 60 phút.

2.3. Thu thập dữ liệu và phân tích thống kê

Tất cả dữ liệu về thời gian gia nhiệt, số lần ép trong 1 đợt, số đợt... được phân tích bằng phần mềm thống kê JASP.

Sau khi xác định được sự thay đổi tổng thể của thời gian gia nhiệt theo chu kỳ, so sánh hậu kiểm có hiệu chỉnh Bonferroni được thực hiện để xác định sự khác biệt giữa các lần ép liên tiếp. Mức ý nghĩa thống kê được thiết lập ở $p < 0,05$.

Để đánh giá mức độ sai khác giữa thời gian gia nhiệt quan sát được và thời gian khuyến cáo của nhà sản xuất, kiểm định t một mẫu (one-sample t-test) được thực hiện cho từng chu kỳ ép với giá trị tham chiếu là 30 giây.

Sau đó, mô hình mô hình hỗn hợp phi tuyến (Non-Linear Mixed-Effects model - NLME) được sử dụng để xây dựng phương trình dự đoán xu hướng biến thiên của thời gian gia nhiệt theo số lần ép. Hiệu suất của mô hình được đánh giá thông qua hệ số xác định (R^2) và ý nghĩa thống kê của các tham số ước lượng [8-9].

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Sự biến thiên thời gian gia nhiệt qua các lần ép liên tục

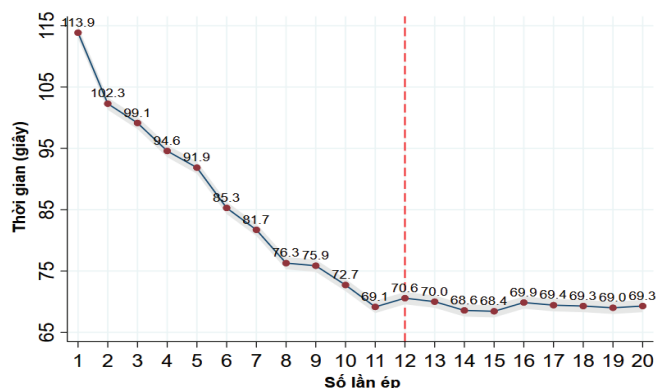
Dữ liệu thu thập được gồm: thời gian định hình nhiệt (giây) cho 20 tấm ép liên tục, tính từ khay thứ nhất đến khay thứ 20 (bảng 1).

Bảng 1. Thời gian gia nhiệt

Lần ép	TPU đơn lớp	
	$\bar{X} \pm SD$ (giây)	Min-max (giây)
1	113,86 $\pm$ 1,57	112-116

Lần ép	TPU đơn lớp	
	$\bar{X} \pm SD$ (giây)	Min-max (giây)
2	102,29 $\pm$ 0,95	101-104
3	99,14 $\pm$ 1,95	97-103
4	94,57 $\pm$ 1,27	93-96
5	91,86 $\pm$ 1,46	90-94
6	85,29 $\pm$ 2,06	83-89
7	81,71 $\pm$ 1,49	80-84
8	76,29 $\pm$ 1,11	75-78
9	75,86 $\pm$ 2,12	73-79
10	72,71 $\pm$ 0,76	72-74
11	69,14 $\pm$ 0,89	68-70
12	70,57 $\pm$ 0,97	69-72
13	70,00 $\pm$ 1,29	68-72
14	68,57 $\pm$ 0,79	68-70
15	68,43 $\pm$ 1,62	67-71
16	69,86 $\pm$ 0,38	69-70
17	69,43 $\pm$ 1,72	66-71
18	69,28 $\pm$ 0,95	68-70
19	69,00 $\pm$ 0,82	68-70
20	69,29 $\pm$ 1,11	68-71

Kết quả Mixed-effects cho TPU đơn lớp.



Hình 3. Biểu đồ biến thiên thời gian thực hiện trung bình qua 20 lần ép

Ghi chú: Đường nét đứt màu đỏ đánh dấu thời điểm quy trình bắt đầu đạt trạng thái ổn định (lần ép thứ 12). Các điểm chấm thể hiện giá trị trung bình; vùng màu xám là khoảng tin cậy 95% CI.

Bảng 2. Kết quả hậu kiểm về thay đổi thời gian qua các lần ép

So sánh giữa các lần ép	Chênh lệch (giây)	p-value	Ý nghĩa
Lần ép 2 so với lần ép 1	-11,57	< 0,001	Thời gian giảm mạnh khi máy từ nguội chuyển sang nóng
Lần ép 3 so với lần ép 2	-3,14	< 0,001	Tiếp tục giai đoạn biến thiên nhiệt mạnh
Lần ép 4 so với lần ép 3	-4,57	< 0,001	Tiếp tục giai đoạn biến thiên nhiệt mạnh
Lần ép 5 so với lần ép 4	-2,71	0,007	Tiếp tục giai đoạn biến thiên nhiệt mạnh
Lần ép 6 so với lần ép 5	-6,57	< 0,001	Tiếp tục giai đoạn biến thiên nhiệt mạnh

So sánh giữa các lần ép	Chênh lệch (giây)	p-value	Ý nghĩa
Lần ép 7 so với lần ép 6	-3,57	< 0,001	Tiếp tục giai đoạn biến thiên nhiệt mạnh
Lần ép 8 so với lần ép 7	-5,43	< 0,001	Tiếp tục giai đoạn biến thiên nhiệt mạnh
Lần ép 9 so với lần ép 8	-0,43	1,000	Có dấu hiệu chứng lại tạm thời (không khác biệt ý nghĩa)
Lần ép 10 so với lần ép 9	-3,14	< 0,001	Thời gian lại tiếp tục giảm có ý nghĩa thống kê
Lần ép 11 so với lần ép 10	-3,57	< 0,001	Thời gian lại tiếp tục giảm có ý nghĩa thống kê
Lần ép 12 so với lần ép 11	1,43	1,000	Bắt đầu đạt trạng thái hằng định nhiệt
Lần ép 13 so với lần ép 12	-0,57	1,000	Duy trì trạng thái hằng định
Lần ép 14 so với lần ép 13	-1,43	1,000	Duy trì trạng thái hằng định
Lần ép 15 so với lần ép 14	-1,43	1,000	Duy trì trạng thái hằng định
Lần ép 16 so với lần ép 15	1,43	1,000	Duy trì trạng thái hằng định
Lần ép 17 so với lần ép 16	-0,43	1,000	Duy trì trạng thái hằng định
Lần ép 18 so với lần ép 17	-0,14	1,000	Duy trì trạng thái hằng định
Lần ép 19 so với lần ép 18	-0,29	1,000	Duy trì trạng thái hằng định
Lần ép 20 so với lần ép 19	0,28	1,000	Duy trì trạng thái hằng định

Ghi chú: Hậu kiểm Bonferroni.

Kết quả hậu kiểm hiệu chỉnh Bonferroni cho thấy sự khác biệt về thời gian gia nhiệt giữa các khay liên tiếp có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$) kéo dài từ lần ép thứ 1 đến lần ép thứ 11. Từ lần thứ 12 trở đi, sự thay đổi về thời gian giữa các lần ép liên tiếp không còn ý nghĩa thống kê ($p = 1,000$), cho thấy việc thiết bị đã đạt trạng thái hằng định.

3.2. So sánh thời gian gia nhiệt với khuyến cáo từ hãng đưa ra

Bảng 4. So sánh thời gian gia nhiệt của hai loại vật liệu với khuyến cáo từ nhà sản xuất

Giai đoạn	Lần ép	n	$\bar{X} \pm SD$ (giây)	Thời gian khuyến cáo (giây)	Hệ số chênh lệch	p-value
Biến thiên	Lần ép 1	7	113,86 $\pm$ 1,57	30	3,79	< 0,0001
	Lần ép 2	7	102,29 $\pm$ 0,95		3,41	< 0,0001
	Lần ép 3	7	99,14 $\pm$ 1,95		3,31	< 0,0001
	Lần ép 4	7	94,57 $\pm$ 1,27		3,15	< 0,0001
	Lần ép 5	7	91,86 $\pm$ 1,46		3,06	< 0,0001
	Lần ép 6	7	85,29 $\pm$ 2,06		2,84	< 0,0001
	Lần ép 7	7	81,71 $\pm$ 1,49		2,72	< 0,0001
	Lần ép 8	7	76,29 $\pm$ 1,11		2,54	< 0,0001
	Lần ép 9	7	75,86 $\pm$ 2,12		2,53	< 0,0001
	Lần ép 10	7	72,71 $\pm$ 0,76		2,42	< 0,0001
	Lần ép 11	7	69,14 $\pm$ 0,89		2,30	< 0,0001

Giai đoạn	Lần ép	n	$\bar{X} \pm SD$ (giây)	Thời gian khuyến cáo (giây)	Hệ số chênh lệch	p-value
Hằng định	Lần ép 12	7	70,57 $\pm$ 0,97	30	2,35	< 0,0001
	Lần ép 13	7	70,00 $\pm$ 1,29		2,33	< 0,0001
	Lần ép 14	7	68,57 $\pm$ 0,79		2,29	< 0,0001
	Lần ép 15	7	68,43 $\pm$ 1,62		2,28	< 0,0001
	Lần ép 16	7	69,86 $\pm$ 0,38		2,33	< 0,0001
	Lần ép 17	7	69,43 $\pm$ 1,72		2,31	< 0,0001
	Lần ép 18	7	69,28 $\pm$ 0,95		2,31	< 0,0001
	Lần ép 19	7	69,00 $\pm$ 0,82		2,30	< 0,0001
	Lần ép 20	7	69,29 $\pm$ 1,11		2,31	< 0,0001

Ghi chú: Kiểm định t một mẫu (one-sample t-test).

Trong 20 lần ép, thời gian gia nhiệt thực tế luôn ở mức cao có ý nghĩa thống kê so với khuyến cáo từ hãng đưa ra ($p < 0,001$). Khi thiết bị đạt trạng thái hằng định nhiệt (từ lần ép 12-20) với thời gian trung bình vẫn cao gấp hơn 2 lần so với thông số của hãng. Tại thời điểm khởi động lần ép 1, thời gian cao gấp gần 4 lần so với mức 30 giây.

3.3. Mô hình dự đoán thời gian gia nhiệt tấm ép TPU đơn lớp

Nhằm dự đoán xu hướng biến thiên của thời gian gia nhiệt theo số lần ép, nghiên cứu sử dụng mô hình NLME để phân tích toàn bộ 20 chu kỳ, trong đó biến độc lập bao gồm 7 đợt độc lập được sử dụng làm yếu tố ngẫu nhiên để kiểm soát các yếu tố gây nhiễu từ điều kiện môi trường [8-9].

Sau phân tích NLME dự đoán thời gian cho vật liệu TPU đơn lớp, kết quả cho thấy: thời gian ép = $66,35 + (124,26 - 66,35) \times e^{-0,197 \times X}$ (X là số thứ tự khay ép).

Mô hình chỉ ra rằng thời gian gia nhiệt giới hạn dưới mà thiết bị có thể đạt được là 66,35 giây ($p < 0,001$) và mức thời gian lúc máy bắt đầu chu kỳ đầu tiên là 124,26 giây ($p < 0,001$). Mô hình giải thích sự biến thiên với độ chính xác cao với $R^2 = 0,97$.

Kết quả sau chạy phương trình cho thấy ngay cả ở mức thời gian thấp nhất 66,35 giây, thì thời gian gia nhiệt của vật liệu vẫn cao gấp hơn 2 lần so với mức khuyến cáo của nhà sản xuất 30 giây. Qua đó khẳng định vật liệu TPU đơn lớp không thể đáp ứng được thông số của hãng dưới bất kỳ điều kiện vận hành nào.

4. BÀN LUẬN

Nghiên cứu *in vitro* này cho thấy thời gian gia nhiệt của tấm TPU đơn lớp giảm rõ rệt theo số chu kỳ ép liên tiếp và đạt trạng thái ổn định khi thiết bị vận hành liên tục. Thời gian gia nhiệt trung bình giảm từ khoảng 113,86 giây ở lần ép đầu xuống khoảng 69-70 giây ở các chu kỳ sau. Sự khác biệt giữa các chu kỳ ép có ý nghĩa thống kê từ lần ép thứ 1 đến lần ép thứ 11, trong khi từ lần ép thứ 12 trở đi sự thay đổi không còn ý nghĩa thống kê, cho thấy hệ thống đã đạt trạng thái hằng định nhiệt. Xu hướng này phù hợp với các nghiên cứu về ép nhiệt vật liệu polymer, trong đó thời gian gia nhiệt giảm khi thiết bị chuyển từ trạng thái khởi động nguội sang trạng thái vận hành ổn định và đạt cân bằng nhiệt [7].

Hiện tượng trên có thể được giải thích bởi hiệu ứng tích tụ nhiệt và quán tính nhiệt của hệ thống gia nhiệt. Khi thiết bị khởi động từ trạng thái nguội, cần nhiều năng lượng hơn để làm nóng buồng gia nhiệt và các bộ phận phát nhiệt,

dẫn đến thời gian gia nhiệt dài ở các chu kỳ đầu. Khi máy hoạt động liên tục, nhiệt độ nền của hệ thống tăng dần và tiến tới trạng thái cân bằng, làm giảm thời gian cần thiết để đạt mức hóa dẻo của vật liệu. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy thời gian gia nhiệt thực tế luôn cao hơn đáng kể so với mức khuyến cáo 30 giây của nhà sản xuất trong toàn bộ 20 chu kỳ ép. Phân tích bằng mô hình NLME cho thấy thời gian gia nhiệt giảm theo hàm mũ và tiệm cận khoảng 66,35 giây, gợi ý đây có thể là giới hạn vận hành thấp nhất của hệ thống trong điều kiện nghiên cứu.

Những phát hiện này có ý nghĩa thực tiễn đối với quy trình sản xuất khay chỉnh nha. Việc bắt đầu ép khay khi thiết bị chưa đạt trạng thái ổn định nhiệt có thể làm thay đổi mức độ hóa dẻo của vật liệu, ảnh hưởng đến độ dày và độ chính xác của khay sau khi ép. Do đó, trong thực hành labo chỉnh nha, nên thiết lập giai đoạn khởi động trước khi sản xuất nhằm đưa thiết bị đến trạng thái ổn định nhiệt, đồng thời xây dựng thông số vận hành phù hợp với thiết bị và vật liệu đang sử dụng thay vì áp dụng hoàn toàn khuyến cáo của nhà sản xuất [6].

Nghiên cứu này có một số hạn chế. Đó là, thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện *in vitro* và chỉ đánh giá trên một loại vật liệu TPU đơn lớp cùng một hệ thống máy ép, do đó kết quả có thể khác khi áp dụng cho các vật liệu hoặc thiết bị khác. Ngoài ra, nghiên cứu chưa đánh giá trực tiếp các chỉ số chất lượng của khay sau khi ép [8-9].

Tóm lại, thời gian gia nhiệt của vật liệu TPU đơn lớp giảm theo số chu kỳ ép liên tiếp và ổn định từ khoảng lần ép thứ 12, đồng thời cao hơn đáng kể so với thông số khuyến cáo của nhà sản xuất. Những kết quả này nhấn mạnh sự cần thiết của việc hiệu chuẩn và chuẩn hóa thông số gia nhiệt trong sản xuất khay chỉnh nha [6].

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu *in vitro* này cho thấy thời gian gia nhiệt của vật liệu TPU đơn lớp trong quá trình ép nhiệt giảm theo hàm mũ khi số chu kỳ ép tăng và đạt trạng thái cân bằng nhiệt từ khoảng lần ép thứ 12. Ngay cả khi thiết bị đã ổn định, thời gian gia nhiệt thực tế vẫn cao hơn hơn 2 lần so với mức khuyến cáo của nhà sản xuất, cho thấy thông số kỹ thuật công bố có thể chưa phản ánh đầy đủ điều kiện vận hành thực tế. Mô hình NLME với độ phù hợp cao ($R^2 = 0,97$) cho phép dự đoán thời gian gia nhiệt theo số chu kỳ ép. Những phát hiện này nhấn mạnh sự cần thiết phải

chuẩn hóa quy trình ép nhiệt và hiệu chuẩn thông số gia nhiệt theo điều kiện thiết bị cụ thể nhằm đảm bảo độ ổn định và chính xác của khay chỉnh nha trong suốt.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi C.L. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. *Angle Orthod*, 2015, 85 (5): 881-889. doi: 10.2319/061614-436.1
- [2] Lombardo L, Arreghini A, Ramina F, Huanca Ghislazoni L.T, Siciliani G. Optimal parameters for clear aligner therapy: a systematic review. *Prog Orthod*, 2017, 18: 20. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15317
- [3] Sheridan J.J, LeDoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. *J Clin Orthod*, 1993, 27 (1): 37-45.
- [4] Ryokawa H, Miyazaki Y, Fujishima A, Miyazaki T, Maki K. The mechanical properties of dental thermoplastic materials used for clear aligners. *Dent Mater J*, 2006, 25 (2): 372-377. doi: 10.1016/j.odw.2006.03.003
- [5] Ryu J.H, Kwon J.S, Jiang H.B, Cha J.Y, Kim K.M. Effects of thermoforming on the mechanical and morphological properties of PET-G aligner materials. *Materials*, 2021, 14: 7492. doi: 10.3390/polym16020203
- [6] Iijima M, Muguruma T, Brantley W.A, Yuasa T, Mizoguchi I. Effect of temperature changes on the mechanical properties of thermoplastic orthodontic materials. *Angle Orthod*, 2015, 85 (4): 654-660.
- [7] Zhang N, Bai Y, Ding X, Zhang Y. Preparation and characterization of thermoplastic materials for clear aligners. *Sci Rep*, 2021, 11: 11119. doi: 10.4012/dmj.2011-120
- [8] Papadimitriou A, Mousouleas S, Gkantidis N, Kloukos D. Clinical effectiveness of orthodontic aligners: a systematic review. *Prog Orthod*, 2018, 19: 37. doi: 10.1186/s40510-018-0235-z
- [9] Phạm Ngọc Anh Thư, Trần Thị Bích Vân. Đánh giá thời gian gia nhiệt trong quá trình ép nhiệt vật liệu chỉnh nha trong suốt. Luận văn thạc sĩ chỉnh nha, Đại học Y Dược thành phố Hồ Chí Minh, 2025.