



DOI:10.22144/ctujos.2026.086

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ KHOAN LASER ĐẾN ĐƯỜNG KÍNH VÀ ĐỘ CÔN TRÊN THÉP KHÔNG GỈ AISI 304 DÀY 0,1 MM

Nguyễn Hoài Tân, Nguyễn Văn Cương, Nguyễn Tuấn Vũ, Tô Lê Hoàng Phúc, Trần Quách Anh Thủ, Đỗ Hữu Trí và Nguyễn Văn Tài*

Khoa kỹ thuật Cơ khí, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): nvtai@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 15/02/2026

Sửa bài (Revised): 20/03/2026

Duyệt đăng (Accepted): 14/05/2026

Title: Study on the effect of laser drilling parameters on the diameter and taper of 0.1 mm thick AISI 304 stainless steel

Author(s): Nguyen Hoai Tan, Nguyen Van Cuong, Nguyen Tuan Vu, To Le Hoang Phuc, Tran Quach Anh Thu, Do Huu Tri and Nguyen Van Tai*

Affiliation(s): Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm khảo sát tác động của công suất laser (P), tần số xung (f) và vận tốc quét (v) đến chất lượng lỗ khoan $400\ \mu\text{m}$ trên vật liệu thép không gỉ AISI 304 có độ dày $0,1\ \text{mm}$. Dựa trên 27 tổ hợp thực nghiệm, kết quả cho thấy độ côn dao động trong khoảng $5,2^\circ - 13,7^\circ$. Sai lệch đường kính so với kích thước thiết kế được ghi nhận ở mức $1 - 15\ \mu\text{m}$. Phân tích ANOVA xác định mối quan hệ giữa các thông số khoan (công suất, tần số, vận tốc) và các chỉ tiêu chất lượng (sai lệch đường kính, độ côn) mang tính chất phi tuyến rõ rệt. Mỗi thông số có mức độ đóng góp và cơ chế tác động riêng biệt lên từng đặc tính hình học của lỗ khoan laser. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa quy trình gia công mà còn mở ra tiềm năng thay thế các phương pháp đặc biệt có chi phí cao trong sản xuất vi linh kiện thuộc lĩnh vực điện tử và y sinh.

Từ khóa: Khoan laser, thép không gỉ AISI 304, sai lệch đường kính, độ côn lỗ khoan

ABSTRACT

To meet the demand for precise micro-hole drilling on thin steel in microelectronics and biomedicine. This study investigates the effects of laser power (P), pulse frequency (f), and scanning speed (v) on the quality of $400\ \mu\text{m}$ micro-holes drilled in $0,1\ \text{mm}$ thick AISI 304 stainless steel. Based on 27 experimental sets, results indicate that the taper angle fluctuated between $5,2^\circ$ and $13,7^\circ$, while the diameter deviation from the design specifications ranged from 1 to $15\ \mu\text{m}$. ANOVA analysis revealed a distinctly non-linear relationship between the drilling parameters (power, frequency, and speed) and the quality indicators (diameter deviation and taper). Each parameter exhibited a unique contribution and mechanism of action on the individual geometric characteristics of the laser-drilled holes. These findings not only provide a scientific foundation for process optimization but also demonstrate the potential to replace specialized, high-cost methods in the manufacturing of micro-components for electronics and biomedical applications.

Keywords: Laser drilling, stainless steel AISI 304, diameter deviation, taper angle

1. GIỚI THIỆU

Thép không gỉ có chiều dày mỏng được ứng dụng rất rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp, đặc biệt trong y khoa và công nghiệp bán dẫn. Việc gia công các lỗ có kích thước nhỏ (micro) đòi hỏi các kỹ thuật chính xác hoặc phương pháp gia công đặc biệt. Gần đây, khoan laser đã trở thành một công cụ hữu hiệu trong gia công các lỗ vi mô trên kim loại nhờ các ưu điểm như gia công không tiếp xúc, độ chính xác cao và khả năng làm việc với nhiều loại vật liệu. Trong số các nguồn laser, laser sợi quang thu hút sự quan tâm đặc biệt do hiệu suất chuyển đổi cao, độ ổn định và tính linh hoạt trong việc điều chỉnh các tham số xung, cho phép gia công chính xác thép không gỉ và các hợp kim có độ bền cao.

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung khảo sát ảnh hưởng của các tham số công nghệ đến chất lượng lỗ khoan bằng laser. Moradi et al. (2016) đã tiến hành các thí nghiệm khoan và đập bằng laser sợi quang, kết quả cho thấy công suất và tần số có ảnh hưởng mạnh đến hình thái lỗ và vật liệu bám dính. Zhang et al. (2015) đã nghiên cứu khoan thép không gỉ 304 bằng laser pico giây và kết luận rằng chế độ khoan xoắn ốc cải thiện độ tròn của lỗ nhưng độ côn đáng kể vẫn còn tồn tại. Ngoài ra, nghiên cứu phân tích cơ chế hình thành lỗ và đặc trưng bên trong trong quá trình khoan và đập đã cung cấp cơ sở lý thuyết cho sự biến đổi hình học của lỗ trong quá trình khoan (Arrizubieta et al., 2013).

Bên cạnh các phương pháp truyền thống, nhiều nghiên cứu đã tập trung khai thác ứng dụng của nguồn laser xung siêu ngắn trong gia công vi lỗ. Cụ thể, Ancona et al. (2009) đã công bố khả năng khoan kim loại hiệu quả bằng hệ thống laser vi mạch khuếch đại sợi quang; thiết bị này không chỉ tối ưu về kích thước và chi phí vận hành mà còn đảm bảo chất lượng lỗ gia công ở mức khả quan. Tiếp nối hướng đi này, Huang et al. (2014) đã chứng minh ưu thế vượt trội của laser sợi quang femto giây, đặc biệt trong việc giảm thiểu độ côn và hạn chế hình thành lớp tái đông đặc (recast layer) trên bề mặt cắt. Đáng chú ý, nghiên cứu của Mincuzzi et al. (2017) đã mở ra một hướng đi quan trọng khi khẳng định khả năng đạt được trạng thái độ côn bằng không (zero taper) trên các phôi kim loại có độ dày lớn. Kết quả này đạt được thông qua việc phối hợp tối ưu hóa các tham số xung cùng với điều khiển quỹ đạo dụng cụ, cung cấp giải pháp triệt để nhằm loại bỏ các sai lệch hình học trong quá trình gia công.

Dưới góc độ phân tích thống kê, Ghoreishi et al. (2002) đã tiến hành so sánh độ côn và độ tròn của lỗ khoan dưới các điều kiện xung (percussion drilling) khác nhau. Nghiên cứu này không chỉ khẳng định tầm quan trọng của việc định lượng các chỉ tiêu hình học mà còn thiết lập nền tảng cho việc kiểm soát chất lượng lỗ bằng các mô hình toán học. Tiếp cận theo hướng tối ưu hóa đa mục tiêu, Chengal et al. (2021) đã triển khai phương pháp phân tích quan hệ Grey Relational Analysis - GRA trong quá trình gia công laser trên thép không gỉ AISI 303. Kết quả nghiên cứu nhấn mạnh ưu thế của các phương pháp phân tích đa tiêu chí trong việc xác lập bộ thông số tối ưu để cải thiện đồng thời nhiều đặc tính chất lượng của lỗ khoan. Bên cạnh đó, khi so sánh về mặt công nghệ, Zhang et al. (2014) chỉ ra rằng mặc dù laser xung ngắn pico giây mang lại độ chính xác hình học vượt trội so với laser nano giây trên vật liệu SS304, song thách thức về việc loại bỏ hoàn toàn độ côn vẫn chưa được giải quyết triệt để.

Những nghiên cứu trước đây tập trung khảo sát ảnh hưởng của các thông số laser đến chất lượng lỗ khoan trên các phôi thép dày. Đối với vật liệu AISI 304 mỏng, khi gia công vi lỗ trên vật liệu này, hành vi nhiệt của vật liệu thay đổi hoàn toàn do khả năng tản nhiệt kém, dẫn đến vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) lớn và dễ gây sai lệch biên dạng lỗ. Do đó, các bộ thông số tối ưu của các nghiên cứu trước không thể áp dụng cho trường hợp này. Bên cạnh đó, các phân tích định lượng tập trung vào mối tương quan giữa sai lệch đường kính (tại bề mặt trên và dưới) và độ côn trong quá trình gia công thép không gỉ tấm mỏng (0,1 mm) bằng laser sợi quang vẫn chưa được khai thác sâu sắc. Đặc biệt, việc chế tạo các vi lỗ (400 μm) trên phôi có độ dày siêu mỏng đang là nhu cầu cấp thiết trong các lĩnh vực điện tử, thiết bị y sinh và kỹ thuật chính xác - nơi mà độ chính xác hình học đóng vai trò tiên quyết đến hiệu năng vận hành của sản phẩm. Do đó, việc làm rõ tác động của công suất (P), tần số (f) và vận tốc quét (v) đến chất lượng tạo hình lỗ trong điều kiện gia công đặc thù này là hết sức cần thiết, nhằm thiết lập cơ sở dữ liệu quan trọng cho quá trình tối ưu hóa sản xuất.

Trong nghiên cứu này, quá trình gia công lỗ bằng laser sợi quang được thực hiện trên vật liệu thép không gỉ SS304 với độ dày 0,1 mm và đường kính thiết kế là 400 μm . Mục tiêu trọng tâm là đánh giá tác động của các tham số khoan bao gồm công suất (P), tần số (f) và vận tốc quét (v) đến sai lệch đường kính và độ côn của lỗ khoan. Các dữ liệu thực nghiệm được xử lý thông qua phương pháp phân tích biến sai (ANOVA) và xây dựng mô hình hồi quy để xác định mức độ ảnh hưởng của các yếu tố

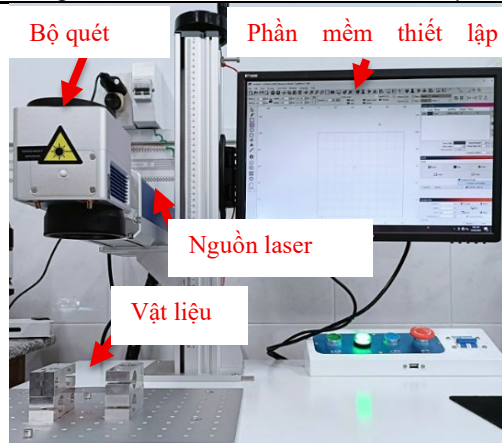
đầu vào. Kết quả nghiên cứu thiết lập cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa quy trình gia công, nhằm giảm thiểu tối đa các sai lệch hình học và nâng cao độ chính xác của sản phẩm.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này là thép cán nguội không gỉ AISI 304 có chiều dày 0,10 mm. Vật liệu này có các tính chất cơ học tốt, khả năng chống mài mòn và chống ăn mòn cao. Vì là thép cán nguội nên theo đặc tính kỹ thuật tiêu chuẩn của loại vật liệu này đạt chuẩn bề mặt 2B/BA, phiê thép có bề mặt nhẵn bóng với độ nhám thấp và đồng nhất giúp giảm thiểu sự nhiễu loạn trong quá trình tương tác giữa chùm tia laser và vật liệu. Đường kính lỗ 400 μm được khoan thử nghiệm bằng phương pháp “trepanning” (Nguyen et al., 2025). Trong các thí nghiệm, hệ thống laser sợi quang MFP-30X-NABBA4.3, Maxphotonics có công suất đầu ra tối đa 30 W được sử dụng để khoan lỗ với các thông số chi tiết trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của máy laser MFP-30X-NABBA4.3, Maxphotonics

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Công suất, P	30	W
Tần số, f	30 – 80	kHz
Vận tốc, v	6.000	mm/s
Bước sóng, λ	1.070	nm
Độ rộng xung, τ	100	ns
Đường kính tiêu điểm, d	30	μm



Hình 1. Sơ đồ bố trí thực nghiệm khoan

Quy trình khoan được bố trí như Hình 1. Tấm vật liệu thép được đặt trên hai trụ đỡ và được giữ phẳng nhờ hai khối kim loại đặt phía trên sau khi được làm sạch bề mặt bằng cồn 70°. Chùm tia laser có đường kính khoảng 30 μm được hội tụ ở mặt trên của tấm thép nhờ thấu kính hội tụ (tiêu cự 110 mm);

sau đó nhờ máy quét điều chỉnh tia laser với các thông số thay đổi theo cài đặt trên máy tính qua phần mềm LightBurn. Quá trình khoan được thực hiện với các thông số đầu vào bao gồm công suất (P), vận tốc (v) và tần số (f); mỗi thông số được thiết kế với 3 mức với các giá trị được trình bày ở Bảng 2. Các bộ tham số trong thí nghiệm (DOE) đã được kiểm tra để thỏa mãn điều kiện chông lấp xung (OP) theo phương trình (1) nhằm đảm bảo lỗ khoan được thông suốt. Nếu $OP \leq 0$, điều đó cho thấy không có sự chông lấp xung; ngược lại nếu $OP > 0$, nó biểu thị mức độ chông lấp giữa hai xung liên tiếp.

$$OP = 1 - \frac{v}{f \times d} \quad (1)$$

Trong đó:

v: tốc độ quét (mm/s)

f: tần số xung (kHz)

d: đường kính điểm hội tụ trên bề mặt của tấm thép ($d = 30 \mu\text{m}$).

Bảng 2. Thông số laser trong thí nghiệm

Thông số	Mức		
	1	2	3
P (W)	20	24	28
f (kHz)	40	50	60
v (mm/s)	600	700	800

Sau khi khoan, các mẫu được vệ sinh bằng siêu âm trong môi trường cồn 90° trong 10 phút để loại bỏ hoàn toàn các tạp chất bề mặt. Kính hiển vi Kaisi K-36565A được sử dụng để quan sát hình thái của lỗ sau khi khoan và kết hợp với phần mềm HAYLAR để đo kích thước của lỗ. Đường kính lỗ được xác định bằng cách đo tại bốn vị trí hướng kính cách nhau 45° (Wang et al., 2025a, 2025b). Sau đó, đường kính của lỗ được tính bằng trung bình cộng của bốn giá trị đo được. Nhằm triệt tiêu các sai lệch cục bộ và phản ánh chính xác kích thước hiệu dụng của lỗ khoan, các điểm tham chiếu được chọn cẩn thận dọc theo đường ranh giới thực tế của vật liệu nền, loại trừ các phần xi bắm dính lồi lõm để giảm sai số.

Sai lệch đường kính lỗ khoan (ΔD) được tính theo công thức (1) dựa vào đường kính mặt trên d_1 và đường kính lỗ khoan yêu cầu 400 μm .

$$\Delta D = |d_1 - 400 \mu\text{m}| \quad (2)$$

Ngoài ra, độ côn (θ) của lỗ khoan được xác định theo phương trình (2) (Ghoreishi et al., 2002):

$$\theta (^{\circ}) = \left(\frac{d_1 - d_2}{2t} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

trong đó:

d_1 : đường kính miệng vào

d_2 : đường kính miệng ra

t: chiều dày tấm thép (0,10 mm).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến đường kính và độ côn của

lỗ khoan được tổng hợp chi tiết tại Bảng 3. Các tiêu chí đánh giá trọng yếu bao gồm sai lệch đường kính ΔD và độ côn θ . Phân tích dữ liệu cho thấy sai lệch đường kính dao động trong khoảng từ 1 μm đến 15 μm . Đáng chú ý, độ côn đạt giá trị tối ưu là $5,2^\circ$ tại điều kiện thực nghiệm số 27 ($P = 28 \text{ W}$, $f = 60 \text{ kHz}$, $v = 800 \text{ mm/s}$). Ngược lại, giá trị độ côn cực đại được ghi nhận là $13,8^\circ$ tại thí nghiệm số 13 ($P = 24 \text{ W}$, $f = 50 \text{ kHz}$, $v = 600 \text{ mm/s}$).

Bảng 3. Các thông số quá trình khoan và kết quả thực nghiệm về sai lệch đường kính lỗ và độ côn

STT	Thông số khoan			Kết quả thực nghiệm			
	Công suất P (W)	Tần số f (KHz)	Vận tốc v (mm/s)	Đường kính lỗ mặt trên d_1 (μm)	Đường kính lỗ mặt dưới d_2 (μm)	Sai lệch đường kính $ d_1 - 400 $ (μm)	Độ côn θ ($^\circ$)
1	20	40	600	406	363	6	12,3
2	20	40	700	402	370	2	9,2
3	20	40	800	401	361	1	11,5
4	20	50	600	407	369	7	10,9
5	20	50	700	412	367	12	12,9
6	20	50	800	408	365	8	12,3
7	20	60	600	406	365	6	11,7
8	20	60	700	402	371	2	8,9
9	20	60	800	402	367	2	10,0
10	24	40	600	415	377	15	10,9
11	24	40	700	402	375	2	7,7
12	24	40	800	406	366	6	11,5
13	24	50	600	408	360	8	13,8
14	24	50	700	409	368	9	11,7
15	24	50	800	402	359	2	12,3
16	24	60	600	403	373	3	8,6
17	24	60	700	401	378	1	6,6
18	24	60	800	401	371	1	8,6
19	28	40	600	402	368	2	9,7
20	28	40	700	408	369	8	11,2
21	28	40	800	407	374	7	9,5
22	28	50	600	402	371	2	8,9
23	28	50	700	409	379	9	8,6
24	28	50	800	408	372	8	10,3
25	28	60	600	404	384	4	5,7
26	28	60	700	402	366	2	10,3
27	28	60	800	403	385	3	5,2
Min	22	40	600	401	359	1	5,2
Max	28	600	800	415	385	15	13,8

Đặc điểm hình thái bề mặt lỗ khoan (mặt trên và mặt dưới) ứng với các thông số chế độ cắt khác nhau được thể hiện thông qua ảnh hiển vi quang học tại Hình 2. Cụ thể, Hình 2a và Hình 2b phản ánh chất lượng bề mặt tại thí nghiệm số 17 ($P = 24 \text{ W}$, $f = 60 \text{ kHz}$, $v = 700 \text{ mm/s}$), nơi sai lệch đường kính được tối ưu hóa ở mức 1 μm . Bên cạnh đó, kết quả quan sát tại thí nghiệm số 27 (Hình 2c và Hình 2d) cho thấy sự cải thiện rõ rệt về độ côn, đạt giá trị nhỏ nhất

là $5,2^\circ$ khi thiết lập thông số $P = 28 \text{ W}$, $f = 60 \text{ kHz}$ và $v = 800 \text{ mm/s}$. Ngoài ra, ảnh hiển vi trong Hình 2b và Hình 2d cho thấy lỗ khoan không tròn tuyệt đối mà có xu hướng bị ô van hóa. Theo các nghiên cứu trước đây của Wang et al. (2025a, 2025b), sự mất đối xứng hình học này là hệ quả của quá trình tích tụ nhiệt, sự hình thành lớp vật liệu tái kết tinh (recast layer) không đồng đều trong môi trường khí,

cùng với tác động của tán xạ chùm tia của plasma ở đáy lỗ.

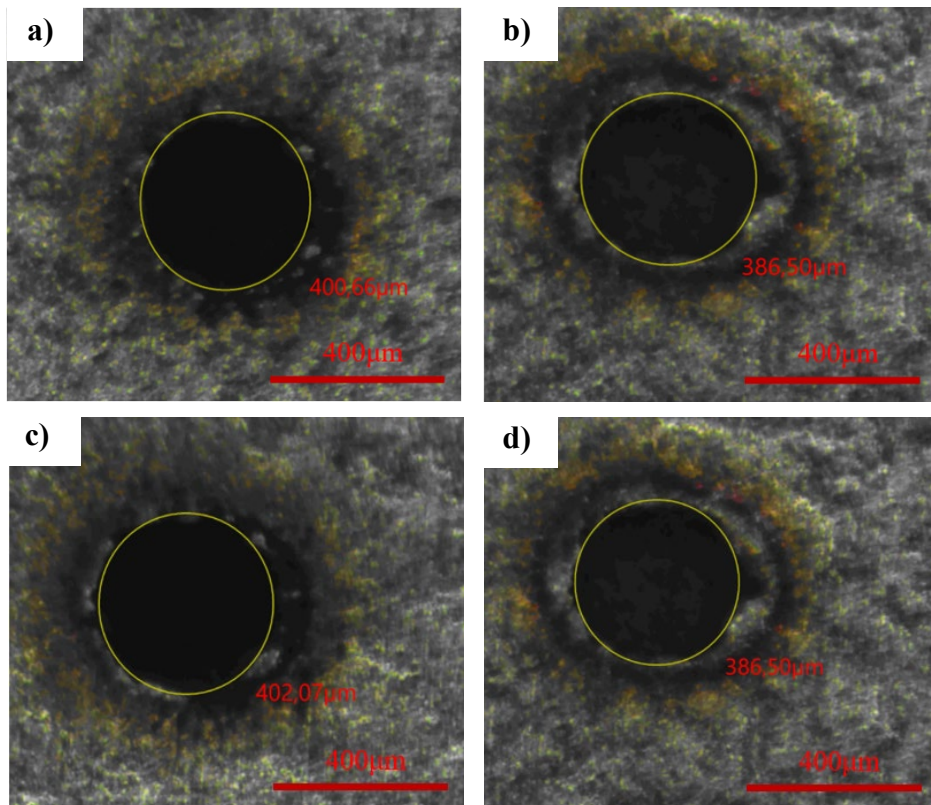
Trong quá trình gia công, sự tập trung năng lượng cao tại tiêu điểm gây ra hiện tượng gia nhiệt cục bộ tức thời, làm vật liệu nóng chảy và thăng hoa mãnh liệt. Quan sát Hình 2, sự xuất hiện của các quang sáng bao quanh lỗ khoan chính là minh chứng cho vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ). Thực nghiệm cho thấy một đặc điểm chung: diện tích HAZ tại mặt dưới (exit) luôn lớn hơn so với mặt trên (entry) của phôi. Hiện tượng này là hệ quả của sự tích tụ năng lượng theo chiều sâu, kết hợp với hiệu ứng phản xạ đa hướng bên trong thành lỗ và khả năng tán nhiệt hạn chế tại vị trí đáy (Arrizubieta et al., 2013).

3.1. Ảnh hưởng của các thông số khoan đến sai lệch đường kính ΔD

Ảnh hưởng của các thông số quá trình bao gồm công suất (P), tần số (f) và vận tốc quét (v) đến sai lệch đường kính của lỗ khoan ($D = 400 \mu\text{m}$) được minh họa trên các biểu đồ Hình 3. Nhìn chung, sai lệch đường kính dao động trong khoảng từ $1 \mu\text{m}$ đến

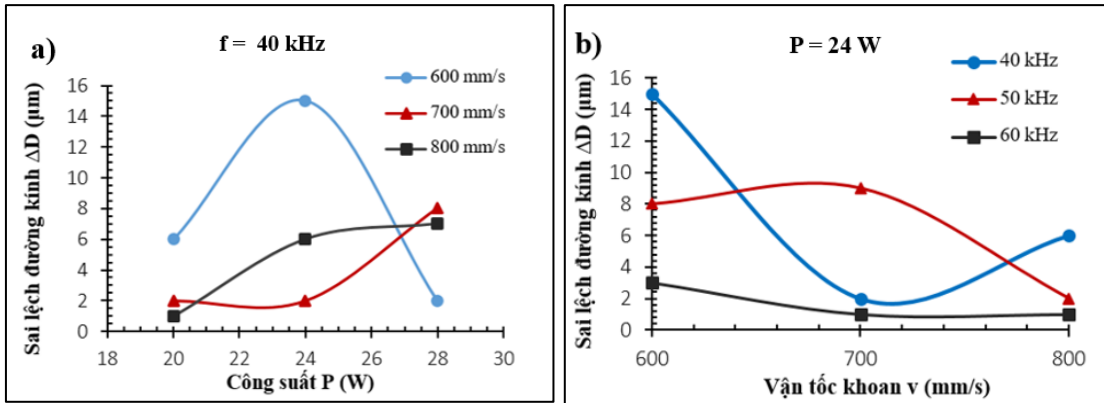
$15 \mu\text{m}$. Dựa trên biểu đồ Hình 3a, với tần số cố định $f = 40 \text{ kHz}$, việc tăng công suất từ 20 W đến 28 W dẫn đến sự gia tăng sai lệch đường kính tại dải vận tốc $700\text{--}800 \text{ mm/s}$. Tuy nhiên, một hiện tượng trái ngược được ghi nhận tại vận tốc 600 mm/s và công suất 28 W , khi sai lệch đường kính có xu hướng giảm. Hiện tượng này có thể được lý giải bởi sự kết hợp giữa vận tốc thấp và công suất cao, tạo ra mật độ năng lượng tập trung lớn tại vùng gia công, thúc đẩy quá trình hóa hơi vật liệu và loại bỏ bavaria hiệu quả hơn.

Xét tại mức công suất 24 W (Hình 3b), sai lệch đường kính có xu hướng tỉ lệ nghịch với vận tốc và tần số khoan. Cụ thể, tại $f = 40 \text{ kHz}$, khi vận tốc tăng từ 600 mm/s đến 800 mm/s , sai lệch giảm đáng kể từ $15 \mu\text{m}$ xuống còn $6 \mu\text{m}$. Xu hướng tương tự cũng được quan sát thấy tại $f = 60 \text{ kHz}$ với mức giảm từ $3 \mu\text{m}$ xuống $1 \mu\text{m}$. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ việc tăng tần số làm tăng tỉ lệ chồng lấp xung (OP), dẫn đến mật độ năng lượng tại vùng tác động cao hơn, hỗ trợ quá trình hóa hơi vật liệu và xỉ gia công diễn ra triệt để hơn.



Hình 2. Hình ảnh hiển vi quang học đường kính mặt trên và mặt dưới của lỗ ở thí nghiệm 17 ($P = 24 \text{ W}$, $f = 60 \text{ kHz}$ và $v = 700 \text{ mm/s}$) và thí nghiệm 27 ($P = 28 \text{ W}$, $f = 60 \text{ kHz}$, $v = 800 \text{ mm/s}$)

Ghi chú: a) Mặt trên lỗ thí nghiệm số 17; b) Mặt dưới lỗ thí nghiệm số 17; c) Mặt trên lỗ thí nghiệm số 27; d) Mặt dưới lỗ thí nghiệm số 27

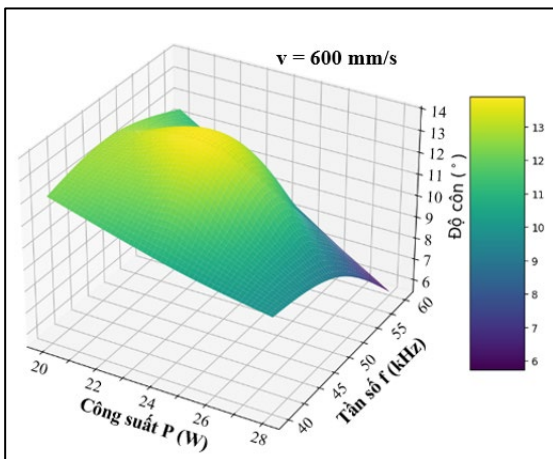


Hình 3. Ảnh hưởng của các thông số khoan đến sai lệch đường kính ΔD

Ghi chú: a) với tần số khoan $f = 40 \text{ kHz}$; b) với công suất khoan $P = 24 \text{ W}$

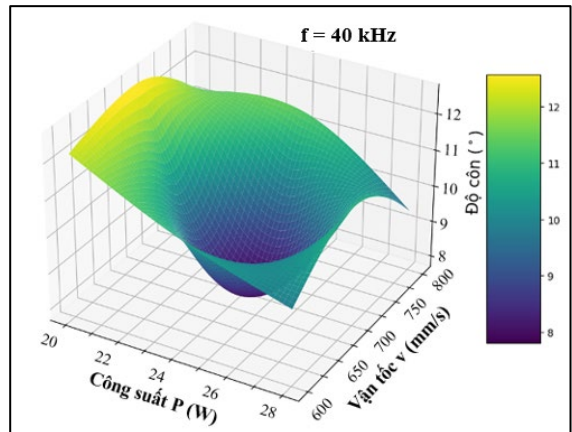
3.2. Ảnh hưởng của các thông số khoan đến độ côn θ ($^\circ$)

Kết quả được thể hiện ở Hình 4 cho thấy sự ảnh hưởng của công suất ($P = 20 - 28 \text{ W}$) và tần số ($f = 40 - 60 \text{ kHz}$) đến độ côn của lỗ khoan tại vận tốc cố định 600 mm/s . Kết quả thực nghiệm cho thấy độ côn có xu hướng giảm nhẹ từ $12,3^\circ$ xuống $9,7^\circ$ khi công suất tăng từ 20 W lên 28 W (tại $f = 40 \text{ kHz}$). Tương tự, khi duy trì công suất ở mức 28 W , việc tăng tần số từ 40 kHz lên 60 kHz giúp độ côn giảm đáng kể từ $9,7^\circ$ xuống còn $5,7^\circ$. Tuy nhiên, giá trị độ côn cực đại được ghi nhận tại điều kiện $P = 24 \text{ W}$ và $f = 50 \text{ kHz}$. Hiện tượng suy giảm độ côn ở các mức năng lượng cao có thể được lý giải do sự gia tăng mật độ năng lượng tác động, thúc đẩy quá trình hóa hơi vật liệu diễn ra đồng nhất giữa bề mặt và đáy lỗ khoan, từ đó cải thiện độ thẳng hàng của thành lỗ và giảm độ côn (Ghoreishi et al., 2002).



Hình 4. Ảnh hưởng của công suất và tần số lên độ côn khi vận tốc khoan $v = 600 \text{ mm/s}$

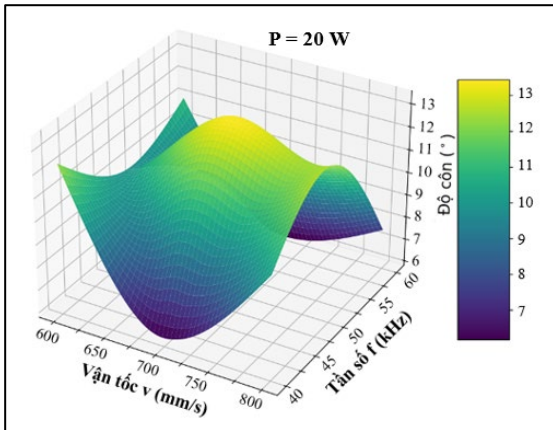
Đồ thị đáp ứng bề mặt 3D Hình 5 minh họa mối quan hệ phi tuyến giữa độ côn với công suất (P) và vận tốc quét (v). Kết quả cho thấy giá trị độ côn tối thiểu được xác lập tại vùng trung gian của các tham số đầu vào, cụ thể tại ngưỡng công suất và vận tốc xấp xỉ 24 W và 700 mm/s và tần số $f = 40 \text{ kHz}$. Trong đó, công suất thể hiện sự ảnh hưởng ưu trội hơn; ban đầu, việc gia tăng công suất từ mức thấp lên trung bình giúp cải thiện đáng kể độ côn. Tuy nhiên, khi vượt ngưỡng công suất này, các hiệu ứng phi tuyến phát sinh có thể do hiện tượng che chắn bởi đám mây plasma (vapor plume) và sự tích tụ nhiệt cục bộ - làm độ côn có xu hướng gia tăng trở lại. Đối với vận tốc quét, thông số này giúp giảm độ côn khi tiến tới ngưỡng tối ưu, song mức độ ảnh hưởng dần bão hòa và giảm đi tại các giá trị vận tốc cao hơn.



Hình 5. Ảnh hưởng của công suất và tốc độ khoan lên độ côn khi tần số $f = 40 \text{ kHz}$

Tại mức công suất cố định 20 W (Hình 6), độ côn giảm mạnh tại cả hai vùng tần số thấp và cao, đặc biệt đạt giá trị tối ưu tại dải vận tốc trung gian

xấp xỉ 700 mm/s. Xu hướng này phản ánh sự thay đổi trong cơ chế phân bố năng lượng trên bề mặt vật liệu gia công. Cụ thể, việc gia tăng tần số dẫn đến sự suy giảm năng lượng đỉnh (peak power) trên mỗi xung đơn lẻ, từ đó hạn chế vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và sự lan truyền nhiệt không kiểm soát. Hệ quả của quá trình này là sự thu hẹp độ rộng lỗ tại mặt dưới, giúp cải thiện đáng kể độ thẳng hàng và làm giảm độ côn của lỗ khoan.



Hình 6. Ảnh hưởng của tốc độ và tần số khoan lên độ côn khi công suất P = 20 W

3.3. Phân tích ANOVA

Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) được thực hiện trên nền tảng Visual Studio (Python) và trình bày chi tiết tại Bảng 4 và Bảng 5.

Về sai lệch đường kính lỗ khoan, kết quả thực nghiệm cho thấy yếu tố tần số (f) và tương tác bậc hai của nó (f²) đóng vai trò chủ đạo với giá trị p < 0,05. Điều này khẳng định tần số là biến số có ý nghĩa thống kê quan trọng nhất, chi phối trực tiếp đến độ chính xác của đường kính lỗ.

Về độ côn của lỗ khoan: Ngược lại, công suất (P) và vận tốc (v), cùng các thành phần tương tác bậc hai tương ứng (P², v²), thể hiện mức độ ảnh hưởng vượt trội so với tần số (f). Hệ quả là sự biến thiên của độ côn phụ thuộc chủ yếu vào sự điều chỉnh công suất và tốc độ quét laser.

Qua phân tích ANOVA, có thể kết luận rằng mối quan hệ giữa các tham số công nghệ (công suất, tần số, vận tốc) và các chỉ tiêu chất lượng (sai lệch đường kính, độ côn) mang tính chất phi tuyến rõ rệt. Mỗi thông số có mức độ đóng góp và cơ chế tác động riêng biệt lên từng đặc tính hình học của lỗ khoan laser.

Bảng 4. Kết quả phân tích ANOVA cho sai lệch đường kính lỗ khoan

Yếu tố	SS	DOF	Giá trị F	Giá trị p	Tỷ lệ đóng góp %
Công suất, P	0,125106	1,0	0,041663	0,840687	0,124123
Tần số, f	19,616919	1,0	6,532871	0,020458	19,462755
Vận tốc, v	1,688229	1,0	0,562218	0,463619	1,674961
Tương tác P ²	0,341959	1,0	0,113880	0,739900	0,339272
Tương tác f ²	21,885376	1,0	7,288317	0,015185	21,713385
Tương tác v ²	1,655082	1,0	0,551179	0,467971	1,642075
Tương tác P-f	3,939368	1,0	1,311897	0,267921	3,908409
Tương tác P-v	0,246210	1,0	0,081994	0,778074	0,244276
Tương tác f-v	0,246210	1,0	0,081994	0,778074	0,244276
Sai số	51,047639	17,0	-	-	50,646470
Tổng	100,792098	26,0			100

Bảng 5. Kết quả phân tích ANOVA cho độ côn của lỗ khoan

Yếu tố	SS	DOF	Giá trị F	Giá trị p	Tỷ lệ đóng góp %
Công suất, P	0,157172	1,0	0,012439	0,912503	0,043127
Tần số, f	54,821890	1,0	4,338678	0,052667	15,042911
Vận tốc, v	0,068761	1,0	0,005442	0,942056	0,018868
Tương tác P ²	0,166667	1,0	0,013190	0,909911	0,045733
Tương tác f ²	60,166667	1,0	4,761671	0,043423	16,509497
Tương tác v ²	0,166667	1,0	0,013190	0,909911	0,045733
Tương tác P-f	6,750000	1,0	0,534204	0,474799	1,852173
Tương tác P-v	27,000000	1,0	2,136816	0,162039	7,408694
Tương tác f-v	0,333333	1,0	0,026380	0,872890	0,091465
Sai số	214,805556	17,0	-	-	58,941799
Tổng	364,4376713				100

4. KẾT LUẬN

Ảnh hưởng của ba thông số công nghệ cốt lõi bao gồm công suất (P), vận tốc quét (v) và tần số xung (f) đến sai lệch đường kính và độ côn của lỗ khoan trên thép không gỉ AISI 304 dày 0,1 mm, với mục tiêu tạo lỗ khoan đường kính 400 μm bằng nguồn laser xung được tập trung phân tích. Kết quả nghiên cứu cho thấy sai lệch đường kính lỗ khoan biến thiên trong khoảng từ 1 μm đến 15 μm . Trong đó, giá trị sai lệch tối ưu 1 μm đạt được với bộ thông số (P = 24 W, f = 60 kHz, v = 700 mm/s). Đối với đặc tính hình học của lỗ, độ côn ghi nhận dao động từ 5,2° đến 13,7°. Cụ thể, tại điều kiện (P = 28 W, f = 60 kHz và v = 800 mm/s) độ côn đạt giá trị thấp nhất 5,2°.

Kết quả phân tích phương sai ANOVA chỉ ra rằng tần số có ý nghĩa thống kê và ảnh hưởng nhiều nhất đến sai lệch đường kính lỗ khoan trong các

thông số. Ngược lại, công suất và vận tốc có ảnh hưởng nhiều nhất đến độ côn của lỗ khoan. Mối quan hệ giữa ba thông số công suất, vận tốc và tần số có ảnh hưởng phi tuyến rõ rệt đến sai lệch đường kính lỗ khoan và độ côn của lỗ.

Những kết quả nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc tối ưu hóa quá trình khoan laser và nâng cao độ chính xác gia công vi lỗ trong các ứng dụng kỹ thuật, mở ra giải pháp thay thế hiệu quả cho các phương pháp gia công đặc biệt tốn kém hiện nay.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm nghiên cứu xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ và tạo điều kiện về cơ sở vật chất của phòng thí nghiệm Cơ học vật liệu và phòng thí nghiệm Máy và thiết bị chế biến LT-TP, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ancona, A., Nodop, D., Limpert, J., Nolte, S., & Tünnermann, A. (2009). Microdrilling of metals with an inexpensive and compact ultra-short-pulse fiber amplified microchip laser. *Applied Physics A*, 94(1), 19–24. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4906-3>
- Arrizubieta, I., Lamikiz, A., Martínez, S., Ukar, E., Taberner, I., & Girot, F. (2013). Internal characterization and hole formation mechanism in the laser percussion drilling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 75, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.08.004>
- Chengal, R. V., Keerthi, T., Nishkala, T., & Maruthi, P. Y. G. (2021). Analysis and optimization of laser drilling process during machining of AISI 303 material using grey relational analysis approach. *SN Applied Sciences*, 3(3), 335. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04337-6>
- Ghoreishi, M., Low, D. K. Y., & Li, Ljj. (2002). Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(9), 985–995. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00038-X)
- Huang, H., Yang, L.-M., & Liu, J. (2014). Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser. *Optical Engineering*, 53(5), 51513. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.5.051513>
- Mincuzzi, G., Faucon, M., Hamoudi, T., Fleureau, M., & Kling, R. (n.d.). *Zero taper, fast drilling of high thickness metal parts*.
- Moradi, M., Mohazab Pak, A., & Khorram, A. (2016). An experimental investigation of the effects of fiber laser percussion drilling: Influence of process parameters. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 9(4), 7–12.
- Nguyen, H. T., Nguyen, V. T., Nguyen, V. C., Nguyen, K. V., & Ho, J. R. (2025). Multi-Quality Decision Using Preference Selection Index Method in Laser Trepan Cutting of Thin Electrical Steel. *Key Engineering Materials*, 1010, 21–29. <https://doi.org/10.4028/p-7WK7p2>
- Wang, L., Wu, C., Rong, Y., Xu, L., & Xia, K. (2025). Optimization Study of Laser-Drilling Processes in Stainless Steel Under Two Scanning Path Strategies. *Metals*, 15(9), 1024. <https://doi.org/10.3390/met15091024>
- Wang, L., Xia, R., Zhou, J., Rong, Y., Wu, C., Xu, L., Han, X., & Xia, K. (2025). Experimental Study on Backwater-Assisted Picosecond Laser Trepanning of 304 Stainless Steel. *Metals*, 15(10), 1138. <https://doi.org/10.3390/met15101138>
- Zhang, H., Di, J., Zhou, M., & Yan, Y. (2014). A comparison in laser precision drilling of stainless steel 304 with nanosecond and picosecond laser pulses. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 27(5), 972–977. <https://doi.org/10.3901/CJME.2014.0723.125>
- Zhang, H., Di, J., Zhou, M., Yan, Y., & Wang, R. (2015). An investigation on the hole quality during picosecond laser helical drilling of stainless steel 304. *Applied Physics A*, 119(2), 745–752. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9023-5>