



DOI:10.22144/ctujos.2026.104

## NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT ĐẾN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT KHI PHAY MẶT LỒM KHUÔN TRÊN THÉP SKD-11

Nguyễn Văn Cường\*, Sơn Hoàng Dũng và Huỳnh Thanh Thương

Trường Bách khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

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

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 28/02/2026

Sửa bài (Revised): 24/03/2026

Duyệt đăng (Accepted): 18/05/2026

**Title:** Investigating the influence of cutting parameters on surface roughness during concave die milling on SKD-11 steel

**Author(s):** Nguyen Van Cuong\*, Son Hoang Dung and Huynh Thanh Thuong

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

### TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt, gồm vận tốc cắt ( $V$ ), lượng chạy dao ( $S$ ) và chiều sâu cắt ( $t$ ) đến độ nhám bề mặt lõm của chi tiết, khi phay vật liệu thép SKD11, sử dụng dao phay ngón dạng cầu trên máy CNC 3 trục. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm toàn phần được sử dụng kết hợp với phân tích hồi quy bằng Minitab, mô hình hồi quy thực nghiệm mô tả quan hệ giữa độ nhám bề mặt và các thông số cắt đã được xây dựng. Giá trị độ nhám bề mặt lõm được xác định từ 0,468  $\mu\text{m}$  đến 3,054  $\mu\text{m}$ , tương ứng với vận tốc cắt từ 75 ÷ 85 m/ph, lượng chạy dao 800 ÷ 1000 mm/ph, chiều sâu cắt 0,1 ÷ 0,3 mm. Mô hình toán học thu được cho thấy chiều sâu cắt và lượng chạy dao là hai yếu tố có ảnh hưởng lớn đến độ nhám bề mặt. Mô hình có thể được dùng để dự đoán độ nhám bề mặt trong gia công, lựa chọn chế độ cắt hợp lý trong gia công bề mặt lõm trên thép SKD11.

**Từ khóa:** Chiều sâu cắt, độ nhám bề mặt, gia công bề mặt lõm, lượng chạy dao, mô hình hồi quy, vận tốc cắt

### ABSTRACT

This study aims to evaluate the influence of cutting parameters, including cutting speed ( $V$ ), feed rate ( $S$ ), and depth of cut ( $t$ ), on the surface roughness of concave parts when milling SKD11 steel with a ball-end mill on a 3-axis CNC machine. Using a full experimental design and regression analysis in Minitab, an experimental regression model describing the relationship between surface roughness and cutting parameters was developed. The surface roughness values for concave parts, after machining, were determined from 0.468  $\mu\text{m}$  to 3.054  $\mu\text{m}$ , corresponding to cutting speeds from 75 ÷ 85 m/min, feed rates from 800 ÷ 1000 mm/min, and depths of cut from 0.1 ÷ 0.3 mm. The resulting regression model showed that depth of cut and feed rate were two factors that significantly influence surface roughness of the workpiece after machining. The model can be used to predict surface roughness during machining and to select appropriate cutting parameters for machining concave surfaces on SKD11 steel.

**Keywords:** Concave-centered surface cutting, cutting speed, depth of cut, feed rate, regression model, surface roughness

## 1. GIỚI THIỆU

Ngành công nghiệp khuôn mẫu hiện nay đang giữ vai trò then chốt trong sản xuất hiện đại, đặc biệt trong các lĩnh vực ô tô, điện tử, nhựa, y tế và hàng tiêu dùng. Chất lượng khuôn phụ thuộc nhiều vào công nghệ chế tạo, chế độ gia công, trong đó các đặc tính về độ chính xác và độ nhám bề mặt của chi tiết khuôn cần được xem xét. Nếu các bộ phận lòng khuôn, lõi khuôn có kích thước kém chính xác hoặc độ bóng bề mặt không đạt yêu cầu thì sản phẩm nhựa được tạo ra bởi khuôn có thể bị biến dạng, không đạt chính xác về hình dáng, kích thước và chất lượng bề mặt. Đặc biệt, các sản phẩm nhựa thành mỏng có thể bị ảnh hưởng đến độ bền, gây gãy vỡ, hư hỏng và độ bóng bề mặt kém.

Trong thiết kế và chế tạo khuôn, bề mặt tự do (Free form surface) thường được sử dụng rộng rãi, các bề mặt này thường được cấu thành từ mười vùng bề mặt cục bộ (Stephen, 2019). Trong đó, bề mặt có cấu trúc lõm là một dạng điển hình thường gặp trong thiết kế và gia công khuôn. Độ chính xác và độ nhám bề mặt các chi tiết có cấu trúc lõm phụ thuộc vào nhiều yếu tố, đặc biệt là vật liệu chế tạo và chế độ gia công (chế độ cắt) có ảnh hưởng trực tiếp. Nếu chất lượng độ bóng bề mặt khi gia công không đạt yêu cầu thì các bước gia công hoàn thiện như mài, đánh bóng tốn nhiều thời gian và chi phí, làm giảm hiệu suất sản xuất.

Quá trình tạo hình bề mặt tự do (freeform surface) của chi tiết đã được tập trung nghiên cứu khá nhiều. Trong quá trình gia công khuôn, đã có những nghiên cứu liên quan được thực hiện như phương pháp tính toán đường chạy dao, sự mài mòn của dao cắt (dao phay) trên máy phay CNC (Thái, 2008); các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng tạo hình bề mặt tự do có cấu trúc dạng elip lõm khi gia công trên máy CNC (Hà, 2014); phương pháp gia công bằng dao phay cầu cho bề mặt parabol trên máy phay CNC 3 trục, với kết quả đánh giá độ nhám bề mặt chi tiết ứng với năm kiểu đường chạy dao 3D offset, spiral, radial ascendant, radial descendent, parallel passes (Adriano et al., 2014). Bên cạnh đó, phương pháp Taguchi cũng được áp dụng trong nghiên cứu để đánh giá tác động của kiểu đường chạy dao, tốc độ cắt và bước tiến ngang đến độ chính xác khi gia công bề mặt chi tiết dạng yên ngựa trên máy phay CNC 3 trục (Quy & Tuyen, 2019); phát triển lý thuyết về tạo hình bề mặt và ứng dụng trong kỹ thuật cơ khí (Long & Tuyền, 2012). Chất lượng bề mặt tự do khi gia công bằng máy phay CNC 3 trục và 5 trục đã được phân tích, việc sử dụng ba kiểu đường chạy dao linear, offset và spiral đã được

nghiên cứu (Zuzana et al., 2022), kết quả nghiên cứu này cho thấy rằng gia công trên máy phay 5 trục mang lại độ chính xác cao hơn đáng kể so với máy phay 3 trục. Ngoài ra, chất lượng tạo hình bề mặt tự do cũng được nghiên cứu (Mikó & Baranyai, 2016).

Kết quả những phân tích trên cho thấy việc đánh giá các ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt như vận tốc cắt ( $V$ ), lượng chạy dao ( $S$ ), chiều sâu cắt ( $t$ ) đến độ nhám và chất lượng bề mặt khi gia công chi tiết có bề mặt lõm được nghiên cứu, với vật liệu thép SKD11. Việc sử dụng dao phay cầu, trên máy CNC 3 trục giúp xác định được mức độ ảnh hưởng của các thông số này đến chất lượng bề mặt chi tiết gia công, đặc biệt giúp dự đoán được độ nhám bề mặt chi tiết trong gia công khuôn.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Vật liệu và thiết bị

Vật liệu được dùng để chế tạo chi tiết là thép SKD11 với thành phần hóa học được trình bày trong Bảng 1. Chi tiết gia công là chi tiết “insert” có cấu trúc tâm lõm, dùng cho khuôn nắp nút dùng khẩn cấp trong tủ điện. Phôi mẫu có dạng hình trụ kích thước  $\phi 60 \times 15$  (mm) ở Hình 1, các mẫu được gia công đồng nhất về hình dạng, kích thước và dung sai. Độ cứng của vật liệu SKD11 trước khi gia công được xác định là  $20 \div 25$  HRC.

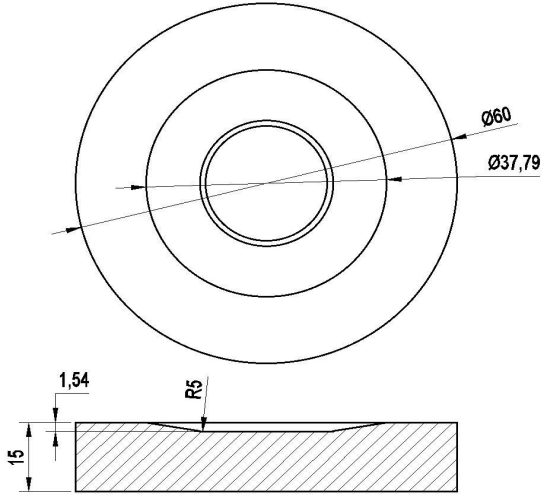
**Bảng 1. Thành phần hóa học của thép SKD11**  
(Fujimetal, 2022)

Thứ tự	Thành phần	%
1	C	1,4 – 1,6
2	Si	$\leq 0,4$
3	Mn	$\leq 0,6$
4	Ni	0,25
5	Cr	11 – 13
6	Mo	0,8 – 1,2
7	V	0,2 – 0,5
8	Cu	0,25
9	P	0,03
10	S	0,03
11	Fe	Còn lại

Thí nghiệm gia công được thực hiện trên máy phay CNC đứng Mazak VCN-430A SG. Các thông số kỹ thuật như kích thước bàn máy là 900 mm x 430 mm, các hành trình theo trục X-Y-Z lần lượt là 560 mm – 430 mm – 510 mm; bộ điều khiển của máy là Mazatrol smooth C.

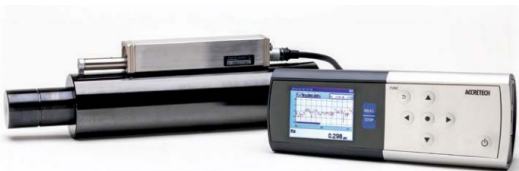
Dụng cụ dao cắt được sử dụng trong thí nghiệm là các loại dao phay thô, dao phay bán tinh và dao phay tinh, lần lượt là các dạng dao phay ngón, đầu băng, hợ kim, đường kính  $D = 6$  mm (Endmill D6

-ES06015 - Hãng Handstone); dao phay cầu hợp kim, bán kính R = 3,0 mm (Ball mill R3.0x12/90-6 - Hãng Widin); dao phay cầu hợp kim, bán kính R = 1,5 mm, chiều dài lưỡi cắt 6 mm, đường kính dao D = 4 mm, chiều dài tổng thể 50 mm, 2 lưỡi cắt (Ball mill R1.5\*6\*D4\*50\*2F - Hãng Widin).



**Hình 1. Hình dạng mẫu thép dùng trong thí nghiệm**

Dung dịch làm nguội được sử dụng là Emuxy 4% và nước, với lưu lượng phun 20 lít/phút trực tiếp vào vùng gia công.



**Hình 2. Máy đo độ nhám bề mặt HANDYSURF**

**Bảng 2. Thông số máy đo độ nhám Handysurf (Accretech, 2025)**

Thông số	Giá trị
Tiêu chuẩn đo	JIS 2013/2001
	ISO 1997/2009
	DIN 1990
	ASME 2002/2009
Tốc độ đo	0,5; 0,6; 0,75; 1,0 mm/s
Lực đo	4 mN/ 5 µm 90°
Độ phân giải	0,0007 µm
Hành trình đọc	16 mm

Thiết bị đo độ nhám bề mặt HANDYSURF+35 của hãng ACCRET như Hình 2, với các thông số được trình bày ở Bảng 2.

## 2.2. Phương pháp thí nghiệm

### 2.2.1. Xác định phương trình hồi quy

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm toàn phần được áp dụng với 3 yếu tố đầu vào là vận tốc cắt (V), lượng chạy dao (S) và chiều sâu cắt (t). Thông số đánh giá là độ nhám bề mặt của chi tiết sau gia công. Theo kết quả của các nghiên cứu trước đây (Tuyên & Ngọc, 2019; Địch, 2003, 2010; Bình và ctv., 2015a, 2015b; Huệ & Thế, 2017), mối quan hệ giữa các thông số chế độ cắt và độ nhám bề mặt gia công  $R_a$  được biểu diễn qua hàm số mũ có dạng:

$$R_a = K_1 \cdot t^{a_1} \cdot S^{a_2} \cdot V^{a_3} \quad (1)$$

Trong đó:  $K_1$  là hằng số;  $a_1, a_2, a_3$  là hệ số thực nghiệm.

Mô hình toán trong phương trình (1) được tuyến tính hóa bằng hàm logarit và được viết lại như sau:

$$\ln R_a = \ln(K_1) + a_1 \cdot \ln(t) + a_2 \ln(S) + a_3 \ln(V) \quad (2)$$

### 2.2.2. Bố trí thí nghiệm

Thí nghiệm gia công chi tiết được xây dựng bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm toàn phần với ba yếu tố V, S, t. Phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) bằng phần mềm Minitab được dùng để phân tích dữ liệu thu được (Ranjit, 2010).

Quá trình gia công thô được thực hiện để bóc tách phần lớn lượng dư vật liệu và tạo hình sơ bộ bề mặt chi tiết. Dao phay ngón, đầu bằng, hợp kim Endmill D6 - ES06015 được sử dụng với các thông số: vận tốc cắt  $V = 30$  m/phút, lượng chạy dao  $S = 600$  mm/phút, chiều sâu cắt  $t = 0,5$  mm; kiểu đường chạy dao Surface rough pocket. Sau đó, quá trình gia công bán tinh được thực hiện để hoàn thiện hình dạng bề mặt lỗm và lượng dư cho gia công tinh. Dao phay cầu hợp kim R3.0\*12/90-6 được sử dụng với các thông số: vận tốc cắt  $V = 40$  m/phút, lượng chạy dao  $S = 650$  mm/phút, chiều sâu cắt  $t = 0,3$  mm; kiểu đường chạy dao Surface high speed. Lượng dư dành cho gia công tinh lớn nhất là 0,3 mm. Trong bố trí từng thí nghiệm với chiều sâu cắt  $t$  là 0,1; 0,2; 0,3 mm, thực hiện nhiều hoặc một lượt chạy dao, đảm bảo chiều sâu cắt của lượt cắt sau cùng tương ứng giá trị  $t$  trong bố trí thí nghiệm.

Đường chạy dao trong gia công tinh được thiết kế và chọn lựa qua mô phỏng trên phần mềm Mastercam. Kết quả mô phỏng với dao phay cầu hợp kim, bán kính  $R = 1,5$  mm, chiều dài lưỡi cắt 6 mm, đường kính dao  $D = 4$  mm, chiều dài tổng thể 50 mm, 2 lưỡi cắt (Ball mill R1.5\*6\*D4\*50\*2F), ở chế độ vận tốc cắt  $V = 85$  m/phút, lượng chạy dao  $S = 1000$  mm/phút, chiều sâu cắt  $t = 0,3$  mm, bước tiến dao ngang  $a_e = 0,1$  mm, cho thấy rằng 2 kiểu đường

chạy dao phù hợp để gia công tinh là Hybrid và Scallop. Tuy nhiên, kiểu Scallop được chọn dùng cho gia công tinh trong nghiên cứu này do có thời gian gia công ngắn nhất. Việc xác định lượng tiến dao và chiều sâu cắt trong trường hợp gia công tinh này là bài toán mô phỏng để xác định kiểu chạy dao. Theo lý thuyết, thường khi gia công tinh thì lượng chạy dao giảm để cải thiện độ nhám. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, việc gia công tinh có lượng chạy dao lớn hơn gia công thô và bán tinh, là do tốc độ quay  $n$  của trục chính tăng (do vận tốc cắt  $V$  tăng), để giữ được lượng ăn dao ( $f_z$ ) nhỏ và không đổi, cần phải tăng lượng chạy dao  $S$  tương ứng, theo công thức:  $S = f_z \cdot z \cdot n$ . Ngoài ra, do đặc điểm của dao cầu, chiều sâu cắt nhỏ để giảm lực cắt, cũng như theo khuyến cáo vùng làm việc tối ưu của dao của nhà sản xuất.

Thí nghiệm gia công tinh để tạo hình bề mặt lõm chi tiết trong nghiên cứu này được thiết kế theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm toàn phần với ba yếu tố đầu vào  $S$ ,  $V$  và  $t$  ( $k = 3$ ), với 3 thí nghiệm được thực hiện lặp lại tại mức tâm  $n_0 = k = 3$  (Tuyên, 2005).

Tổng số thí nghiệm:  $N = 2^k + n_0 = 8 + 3 = 11$ .

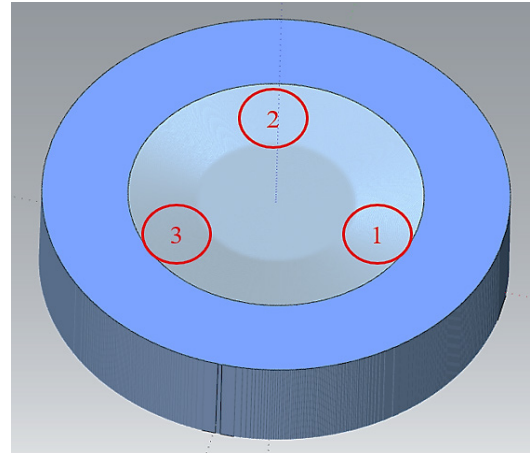
Các thông số chế độ cắt cùng mức giá trị lựa chọn để khảo sát được thể hiện ở Bảng 3.

**Bảng 3. Bảng giá trị các thông số chế độ cắt**

Yếu tố	$V (X_1)$	$S (X_2)$	$t (X_3)$
Mức cao (+1)	85	1000	0,3
Mức cơ sở (0)	80	900	0,2
Mức thấp (-1)	75	800	0,1
Khoảng biên thiên	5	100	0,1

Tổ hợp các thí nghiệm và kết quả xác định độ nhám được trình bày trong Bảng 4. Ở mỗi thí nghiệm, giá trị độ nhám  $R_{a1}$ ,  $R_{a2}$ ,  $R_{a3}$  được đo ở 3 vị trí khác nhau (Hình 3), từ đó giá trị trung bình  $R_{a\text{tb}}$  đã được xác định. Trong đó, vận tốc cắt ( $V$ ) có giá trị thay đổi từ  $75 \div 85$  m/ph, lượng chạy dao ( $S$ ) có giá trị từ  $800 \div 1000$  mm/ph, chiều sâu cắt thay đổi từ  $0,1 \div 0,3$  mm. Các thông số chế độ cắt ban đầu được lựa chọn dựa trên khuyến cáo của nhà sản xuất chỉ mang tính định hướng. Trong thực tế, điều kiện gia công được xác định trên cơ sở thông số hoạt động của máy CNC hiện có, độ cứng vững của máy, tình trạng dao và đặc tính vật liệu SKD11 có thể ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng bề mặt. Do đó, phương pháp quy hoạch thực nghiệm toàn phần đã được sử dụng để khảo sát và đánh giá độ nhạy của từng yếu tố ( $V$ ,  $S$ ,  $t$ ) đến độ nhám bề mặt. Các kết quả thu được có tính thực nghiệm cao và phản ánh

đúng điều kiện gia công thực tế, đảm bảo độ tin cậy của mô hình trong phạm vi được chọn.



**Hình 3. Vị trí đo độ nhám bề mặt lõm chi tiết**

### 2.2.3. Phân tích kết quả

Kết quả giá trị độ nhám trung bình được phân tích bằng phần mềm Minitab. Các hệ số của mô hình toán trong phương trình (2) được xác định với độ tin cậy của mô hình được đánh giá qua phương pháp phân tích phương sai.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Độ nhám bề mặt chi tiết

Kết quả nghiên cứu cho thấy ba thông số chế độ cắt là vận tốc cắt ( $V$ ), lượng chạy dao ( $S$ ) và chiều sâu cắt ( $t$ ) đều có ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt của chi tiết gia công. Độ nhám trung bình ( $R_{a\text{tb}}$ ) đo được trong 11 thí nghiệm ứng với chế độ cắt khác nhau được trình bày trong Bảng 4.

Mức độ ảnh hưởng của từng thông số và tác động kết hợp giữa các thông số đến độ nhám bề mặt chi tiết được xác định thông qua các hệ số  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ . Trong giới hạn điều kiện thông số hoạt động, độ nhám trung bình của bề mặt lõm của chi tiết sau gia công được xác định có giá trị từ  $0,468 \mu\text{m}$  đến  $3,054 \mu\text{m}$ . Các giá trị này hoàn toàn hợp lý với giá trị độ nhám đạt được trong gia công khuôn bằng thép SKD 11 nói chung.

Kết quả phân tích hồi quy bằng phần mềm Minitab cho thấy các giá trị độ nhám thu được ở các thí nghiệm có độ tin cậy cao với các hệ số  $R$ -Sq và  $R$ -Sq (adj) đều lớn hơn 99,9% (Bảng 7). Giá trị hệ số trong mô hình hồi quy (3) và mức độ ảnh hưởng của các yếu tố được xác định và thể hiện qua Bảng 5, Bảng 6. Trong đó, các giá trị hệ số thể hiện tác động độc lập của từng yếu tố thông số gia công, các tương tác đôi, tương tác ba giữa các yếu tố đến độ nhám bề mặt trung bình của chi tiết.

**Bảng 4. Bảng ma trận tổ hợp thí nghiệm và kết quả xác định độ nhám trung bình.**

STT	Biến mã hóa			Biến thực nghiệm			Kết quả đo độ nhám Ra( $\mu$ m)			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	V(m/ph)	S(mm/ph)	t(mm)	Ra <sub>1</sub>	Ra <sub>2</sub>	Ra <sub>3</sub>	Ra <sub>tb</sub>
1	-1	-1	-1	75	800	0,1	0,523	0,444	0,438	0,468
2	+1	-1	-1	85	800	0,1	0,597	0,587	0,652	0,612
3	-1	+1	-1	75	1000	0,1	0,836	0,789	0,831	0,819
4	+1	+1	-1	85	1000	0,1	0,778	0,797	0,776	0,784
5	-1	-1	+1	75	800	0,3	2,176	2,302	2,368	2,282
6	+1	-1	+1	85	800	0,3	2,555	2,570	2,683	2,603
7	-1	+1	+1	75	1000	0,3	2,617	2,990	2,571	2,726
8	+1	+1	+1	85	1000	0,3	3,061	3,060	3,040	3,054
9	0	0	0	80	900	0,2	2,456	2,482	2,597	2,512
10	0	0	0	80	900	0,2	2,640	2,471	2,476	2,529
11	0	0	0	80	900	0,2	2,573	2,493	2,570	2,545

**Bảng 5. Hệ số trong mô hình hồi quy quan hệ giữa Ln(Ra<sub>tb</sub>) với Ln(V) = X<sub>1</sub>, Ln(S) = X<sub>2</sub> và Ln(t) = X<sub>3</sub>**

Biến (Term)	Ảnh hưởng (Effect)	Hệ số (Coef)	Sai số chuẩn (SE Coef)	Giá trị T (T-Value)	Giá trị P (P-Value)
Hằng số (Constant)		1,66838	0,00595	280,29	0,000
V (X <sub>1</sub> )	0,18925	0,09462	0,00595	15,90	0,004
S (X <sub>2</sub> )	0,35425	0,17713	0,00595	29,76	0,001
t (X <sub>3</sub> )	1,99542	0,99771	0,00595	167,62	0,000
V*S (X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub> )	-0,04292	-0,02146	0,00595	-3,61	0,069
V*t (X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub> )	0,13492	0,06746	0,00595	11,33	0,008
S*t (X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub> )	0,09325	0,04663	0,00595	7,83	0,016
V*S*t (X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub> )	0,04642	0,02321	0,00595	3,90	0,060
Điểm trung tâm (Ct Pt)		0,8603	0,0114	75,48	0,000

**Bảng 6. Mức độ ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến độ nhám qua phân tích Anova.**

Nguồn (Source)	Bậc tự do (DF)	Tổng bình phương (Seq SS)	Mức đóng góp (Contribution)	Tổng bình phương hiệu chỉnh (Adj SS)	Trung bình bình phương hiệu chỉnh (Adj MS)	Giá trị F (F-Value)	Giá trị P (P-Value)
Model	8	9,96255	99,99%	9,96255	1,24532	4393,52	0,000
Linear	3	8,28599	83,17%	8,28599	2,76200	9744,41	0,000
V	1	0,07163	0,72%	0,07163	0,07163	252,72	0,004
S	1	0,25099	2,52%	0,25099	0,25099	885,49	0,001
t	1	7,96338	79,93%	7,96338	7,96338	28095,01	0,000
2-Way Interactions	3	0,05748	0,58%	0,05748	0,01916	67,60	0,015
V*S	1	0,00368	0,04%	0,00368	0,00368	13,00	0,069
V*t	1	0,03641	0,37%	0,03641	0,03641	128,44	0,008
S*t	1	0,01739	0,17%	0,01739	0,01739	61,36	0,016
3-Way Interactions	1	0,00431	0,04%	0,00431	0,00431	15,20	0,060
V*S*t	1	0,00431	0,04%	0,00431	0,00431	15,20	0,060
Curvature	1	1,61477	16,21%	1,61477	1,61477	5696,95	0,000
Error	2	0,00057	0,01%	0,00057	0,00028		
Total	10	9,96312	100,00%				

Mô hình toán hồi quy được xác định theo công thức:

$$Ra_{tb} = -10,21 + 0,1141 V + 0,0117 S + 28,41 t - 0,000136 V*S - 0,283 V*t - 0,03247 S*t + 0,000464 V*S*t + 0,8603 Ct*Pt$$

Trong quá trình gia công chi tiết, có thể bỏ qua sự ảnh hưởng của độ mòn dao đến độ nhám bề mặt chi tiết. Do chi tiết gia công có kích thước nhỏ, thời gian gia công một mẫu rất ngắn (nhỏ hơn 2 phút), lượng dư gia công nhỏ (0,2 mm), nên có thể xem như độ mòn dao không đáng kể và không có ảnh hưởng đáng kể đến độ nhám bề mặt chi tiết sau gia công. Ba vị trí được xác định độ nhám có mặt cong, bề dày phần mặt cong này khá nhỏ (1,54 mm), bán kính cong là 5 mm (Hình 1), nên kiểu chạy dao Scallop được lựa chọn. Đây là phương pháp chạy dao 3D nhằm đạt được sự đồng đều bề mặt tốt nhất, được kiểm chứng qua mô phỏng.

### 3.2. Ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt

Các số liệu phân tích được thể hiện qua phương trình hồi quy (3), phân tích phương sai ở bảng 6 và bảng 7, đồ thị Pareto Hình 5 và biểu đồ Hình 4 của các yếu tố ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt. Kết quả cho thấy các thông số chế độ cắt là vận tốc cắt, lượng chạy dao và chiều sâu cắt, cũng như tương tác đôi và tương tác ba của các yếu tố đều có ảnh hưởng đến độ nhám khi gia công bề mặt có cấu trúc tâm lõm.

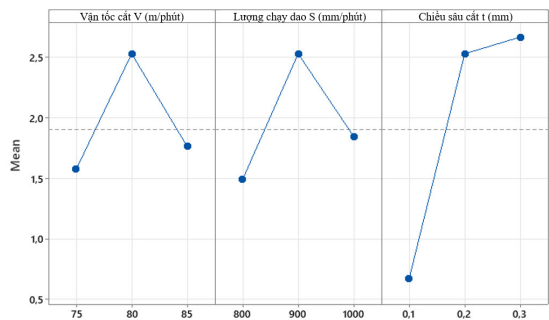
**Bảng 7. Độ tin cậy mô hình hồi quy**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0168358	99,99%	99,97%	*

Trong các yếu tố ảnh hưởng, yếu tố chiều sâu cắt (t) có tác động lớn nhất đến độ nhám bề mặt, với mức đóng góp lên đến 79,93%, F-value cao (5969,01) và P-value nhỏ hơn 0,05 (P = 0,000). Sự ảnh hưởng của yếu tố này cũng thể hiện rõ với tỷ lệ ảnh hưởng lớn nhất trên đồ thị Pareto và giá trị hệ số cao trong phương trình hồi quy. Khi chiều sâu cắt tăng, độ nhám bề mặt có xu hướng tăng rõ rệt (Hình 4). Hai yếu tố còn lại là tốc độ cắt (V) và lượng chạy dao (S) có ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt gia công thấp hơn, với mức đóng góp trong mô hình lần lượt là 0,72% và 2,52%; cả hai yếu tố này đều có ý nghĩa tác động đến mô hình, với giá trị P < 0,05. Trong Hình 4, hai yếu tố này có ảnh hưởng lớn nhất lần lượt ứng với giá trị 80 m/ph và 900 mm/ph. Khi tăng tốc độ cắt, độ nhám có thể tăng rất ít do hệ số nhỏ (0,1141); trong khi tăng lượng chạy dao, mức ảnh hưởng sẽ nhỏ hơn với hệ số lượng chạy dao nhỏ

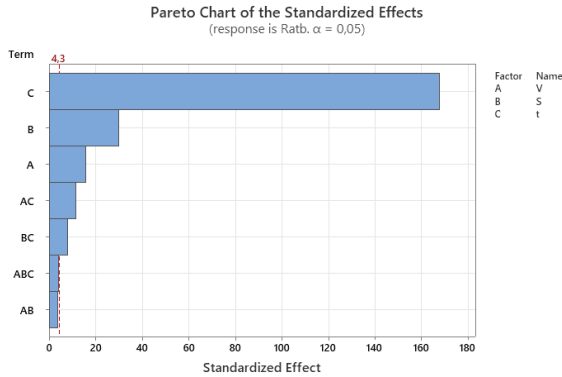
(0,0117). Trong Bảng 4, ở các thí nghiệm 1, 2, 3 và 4, khi cùng tốc độ cắt V và chiều sâu cắt t, bước tiến S lớn hơn thu được độ nhám lớn hơn; do khi tăng bước tiến thì các đỉnh nhám càng cách xa nhau, kết hợp kết cấu dao cầu nên chiều cao nhám tăng. Tương tự, với cùng vận tốc cắt V và bước tiến S, chiều sâu cắt t tăng từ 0,1 đến 0,3 cho được độ nhám có xu hướng tăng rõ rệt, thể hiện qua giá trị Ra trong Bảng 4. Nguyên nhân là khi chiều sâu cắt tăng, lực cắt và tải trọng tác động lên dao tăng theo, làm tăng rung động và biến dạng trong quá trình gia công. Với kết cấu dao cầu nên khả năng cắt và làm việc tốt hơn khi ở chiều sâu thích hợp, tuy nhiên, khi chiều sâu cắt lớn quá đã làm tăng chiều cao nhấp nhô bề mặt gia công.

Các tương tác đôi giữa tốc độ cắt và chiều sâu cắt (V\*t), giữa lượng chạy dao và chiều sâu cắt (S\*t) đều có ý nghĩa thống kê với P-value lần lượt là 0,008 và 0,016 mặc dù mức đóng góp nhỏ (0,37% và 0,17%). Trong khi đó, tương tác đôi giữa tốc độ cắt và lượng chạy dao (V\*S), tương tác ba giữa tốc độ cắt, lượng chạy dao và chiều sâu cắt (V\*S\*t) có P-value lần lượt là 0,069 và 0,060 (gần ngưỡng ý nghĩa P = 0,05), mức đóng góp chỉ đạt 0,04% là rất nhỏ, có ảnh hưởng rất ít trong một số trường hợp thực nghiệm nhất định. Đặc biệt, yếu tố độ cong (curvature) của mô hình có mức đóng góp 16,21% và P-value = 0,000, cho thấy sự tồn tại của quan hệ phi tuyến giữa các yếu tố đầu vào và độ nhám bề mặt. Do đó, mô hình toán hồi quy bậc hai với các tương tác hai, tương tác ba là cần thiết để mô tả chính xác mối quan hệ này.

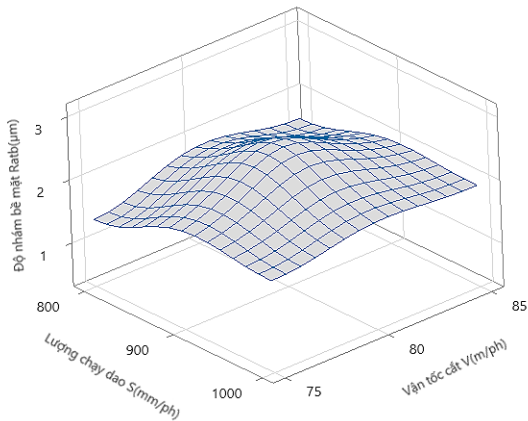


**Hình 4. Biểu đồ ảnh hưởng các yếu tố V, S và t đến độ nhám bề mặt (Ra<sub>tb</sub>)**

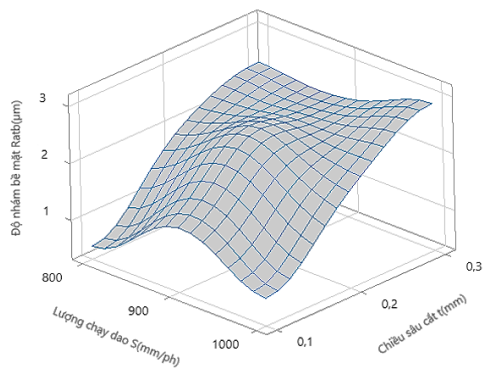
Các đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt khi gia công (Ra<sub>tb</sub>) với vận tốc cắt (V) và lượng chạy dao (S), độ nhám bề mặt với chiều sâu cắt (t) và lượng chạy dao (S), độ nhám bề mặt với chiều sâu cắt (t) và vận tốc cắt (V) được thể hiện lần lượt qua các Hình 6, Hình 7 và Hình 8.



Hình 5. Đồ thị Pareto của các ảnh hưởng.



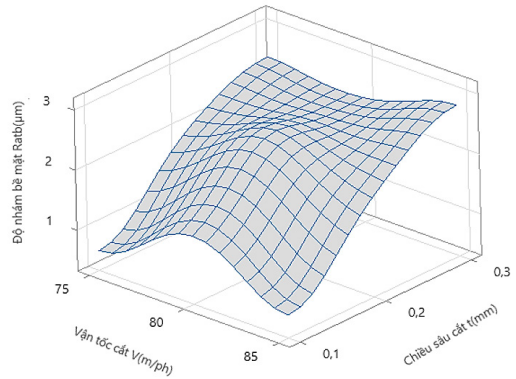
Hình 6. Quan hệ độ nhám bề mặt với vận tốc cắt V và lượng chạy dao S



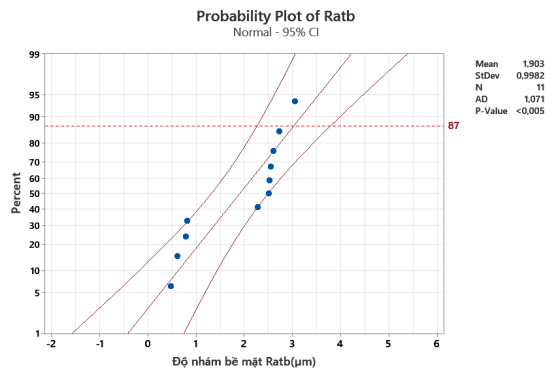
Hình 7. Quan hệ độ nhám bề mặt với chiều sâu cắt t và lượng chạy dao S

Biểu đồ Probability Plot ở Hình 9 cho thấy sự phân bố chuẩn của độ nhám ( $Ra_{1b}$ ), phần lớn các điểm dữ liệu phân bố gần đường trung tâm, cho thấy xu hướng phân phối gần chuẩn. Chỉ số Anderson-Darling (AD) thu được là 1,071 và giá trị P-value < 0,005 cho thấy có sự sai khác nhất định so với phân phối chuẩn ở mức ý nghĩa 5%. Sự sai khác này có

thể chấp nhận được trong bối cảnh thí nghiệm DOE với kích thước mẫu nhỏ ( $N = 11$ ). Kết quả này cho thấy mô hình vẫn có thể được sử dụng để phân tích phương sai và xây dựng mô hình toán hồi quy.

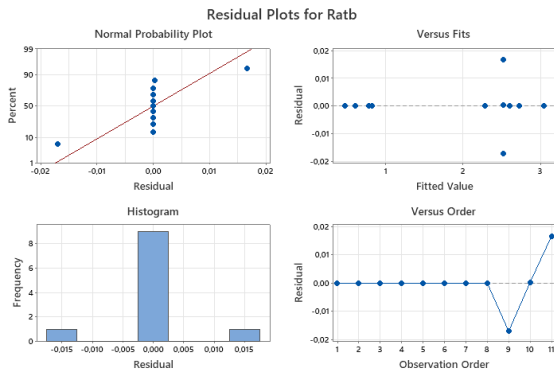


Hình 8. Quan hệ độ nhám bề mặt với chiều sâu cắt t và vận tốc cắt V



Hình 9. Biểu đồ Probability Plot kiểm tra phân phối chuẩn của  $Ra_{1b}$  trong Minitab

Các đồ thị phân tích sai số giữa mô hình hồi quy và thực tế trong Minitab ở Hình 10 cho thấy hầu hết các điểm dữ liệu đều phân bố gần đường chéo ở biểu đồ Normal Probability Plot, chỉ có một điểm ở biên xa hơn, cho thấy phân dư gần với phân phối chuẩn. Trong khi đó, biểu đồ Versus Fits để kiểm tra độ phù hợp của mô hình hồi quy với các giá trị thực nghiệm cho thấy các điểm dữ liệu được phân bố đều xung quanh trục hoành, minh chứng cho sự phù hợp của mô hình hồi quy. Biểu đồ Histogram được phân bố đối xứng, hình dạng gần giống với phân phối chuẩn, cho thấy sai số mô hình nhỏ và dữ liệu phù hợp với giả định phân phối chuẩn. Biểu đồ Versus Order cho thấy phần lớn các điểm dao động nhỏ và không theo xu hướng tăng (hoặc giảm) liên tục theo thời gian, cho thấy dữ liệu không bị ảnh hưởng bởi trình tự thực hiện và mô hình không có yếu tố nhiễu theo thời gian.



**Hình 10. Các biểu đồ thể hiện sai số giữa mô hình hồi quy và thực tế trong Minitab**

Kết quả phân tích trên cho thấy mô hình toán hoàn toàn phù hợp, có thể được áp dụng để tiên đoán độ nhám bề mặt gia công bề mặt lõm chi tiết trong gia công khuôn bằng thép SKD11 với những điều kiện gia công tương tự như trong nghiên cứu này. Về bản chất, thép SKD11 là hợp kim có độ cứng cao, khả năng chống mài mòn tốt và tính dẫn nhiệt kém hơn so với các loại thép các-bon thông thường (C35, C45, C50). Do đó, mô hình toán trong nghiên cứu này chưa thể được áp dụng khi gia công với các loại thép các-bon thường; mà cần phải có những nghiên cứu chi tiết hơn. Vận tốc cắt (V) khi cắt thép SKD11 thường được chọn thấp hoặc trung bình, trong khi thép C35, C45, C50 có thể sử dụng vận tốc cắt cao hơn, do có độ cứng thấp và dễ gia công hơn. Lượng chạy dao (S) khi gia công thép SKD11 cần được kiểm soát chặt chẽ hơn, nhằm giảm tải trọng lên lưỡi cắt, giữ ổn định khi gia công; trong khi với thép các-bon thường, lượng chạy dao có thể lớn hơn, nhưng vẫn đảm bảo độ ổn định tốt. Chiều sâu cắt (t) khi gia công thép SKD11 thường được chọn nhỏ hơn so với thép các-bon thường nhằm giảm lực cắt, hạn chế rung động.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

Accretech. (2025). *Handysurf+*. <https://accretech.vn/san-pham/handysurf/>

Adriano, F. S., Adriane, M., Sueli, F. B., & Anselmo, E. D. (2014). Evaluating the Roughness According to the Tool Path Strategy When Milling Free Form Surfaces for Mold Application. *Procedia CIRP*, 14, 188 – 193. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.089>

Bình, N. T., Bồng, P. V., Đông, P. V., & Bảo, N. C. (2015a). Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi gia công SUS 304 trên trung tâm gia công CNC TC500. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 31, 28-33.

### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế thực nghiệm theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm và xây dựng được mô hình hồi quy toán học mô tả mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt lõm của chi tiết gia công và các thông số chế độ cắt gồm vận tốc cắt (V), lượng chạy dao (S) và chiều sâu cắt (t). Kết quả thực nghiệm cho thấy độ nhám bề mặt thay đổi trong khoảng từ 0,468  $\mu\text{m}$  đến 3,054  $\mu\text{m}$ . Việc phân tích kết quả cho thấy chiều sâu cắt (t) là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt, tiếp đến là vận tốc cắt (V) và lượng chạy dao (S). Kết quả này phù hợp với bản chất vật lý của quá trình gia công, khi chiều sâu cắt tăng làm gia tăng lực cắt, biến dạng và rung động, dẫn đến độ nhám bề mặt tăng rõ rệt. Trong khi đó, ảnh hưởng của lượng chạy dao nhỏ hơn, do trong phạm vi khảo sát có khoảng biến thiên hẹp (800 ÷ 1000 mm/ph), đặc điểm tiếp xúc của dao phay cầu khi gia công tinh bề mặt lõm. Đồng thời, các tương tác hai chiều giữa các thông số S và t cũng có ảnh hưởng nhất định đến độ nhám bề mặt trong nghiên cứu này.

Mô hình hồi quy thu được không chỉ phản ánh xu hướng biến thiên của độ nhám bề mặt trong phạm vi khảo sát mà còn có thể sử dụng như một công cụ dự đoán hiệu quả trong thực tiễn sản xuất. Đây là cơ sở quan trọng cho việc lựa chọn và tối ưu hóa chế độ cắt nhằm nâng cao chất lượng bề mặt và độ chính xác gia công khi phay bề mặt lõm trên thép SKD11 bằng máy CNC 3 trục.

### LỜI CẢM ƠN

Trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ kỹ thuật và thiết bị của Phòng thí nghiệm CAD/CAM/CNC, Trường Bách khoa, Đại học Cần Thơ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

Bình, N. T., Ninh, N. H., & Dũng, H. T. (2015b). Khảo sát ảnh hưởng của chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi phay cao tốc trên máy 5 trục UCP600. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 53, 671-678.

Địch, T. V. (2010). *Các phương pháp xác định độ chính xác gia công*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.

Địch, T. V. (2003). *Nghiên cứu độ chính xác gia công bằng thực nghiệm*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.

Fujimetal. (2022). *Thép SKD là gì*. <https://fujimetal.vn/thep-skd11-la-gi-kha-nang-nhiệt-luyen-thep-skd11/>

- Hà, T. M. (2014). *Nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng tạo hình bề mặt tự do cấu trúc elip lõm khi gia công trên máy phay CNC* (Luận án tiến sĩ). Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- Huê, P. T. M., & Thê, P. M. (2017). Nghiên cứu sự ảnh hưởng của chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi tiện vật liệu SUS 304. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Xây dựng*, 11(3), 83-89.
- Long, B.T., & Tuyên, B. N. (2012). *Lý thuyết tạo hình bề mặt và ứng dụng trong kỹ thuật cơ khí*. NXB Giáo dục Việt Nam.
- Mikó, B., & Baranyai, G. (2016). *Comparision of milling strategies in case of free form surface milling - Development in machining technology*. Cracow University of Technology, Cracow, 6, 76-86.
- Quy, H.V., & Tuyen, B.N. (2019). Effect of feed rate, toolpath and step over on geometric accuracy of freeform surfaces when 3 axis CNC milling. *Applied Mechanics and Materials*, 889, 107-114.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.889.107>
- Ranjit, K. R. (2010). *A primer on the taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
- Stephen, P. R. (2019). *Kinematic geometry of surface machining*. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC.
- Thái, T.X. (2008). *Tính toán đường dụng cụ trong tạo hình bề mặt và nghiên cứu mài mòn dao phay đầu bằng khi gia công khuôn mẫu trên máy phay CNC* (Luận án tiến sĩ). Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- Tuyên, B. N., & Ngọc, L. Q. (2019). *Ảnh hưởng của một số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi mài phẳng thép SKD11 đã nhiệt luyện*. Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- Tuyên, N. M. (2005). *Quy hoạch thực nghiệm*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- Zuzana, G., Peter, I., Marek, V., Luboš, K., Jozef, B., & Michal, D. (2022). Influence of Ball-End Milling Strategy on the Accuracy and Roughness of Free Form Surfaces. *Application Science*, 12(9), 4421.  
<https://doi.org/10.3390/app12094421>