

PHẦN 4: RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Optimization of CNC Turning Parameters in Machining EN19 using Face-Centered Central Composite Design Based RSM

M. V. Satish Kumar, M. Pradeep Kumar, S. Vamshi Krishna, K. Vikram Kumar

4.1 Tóm tắt nội dung bài báo khoa học

Ngày nay, đảm bảo chất lượng trong quá trình gia công đóng vai trò vô cùng quan trọng trong ngành công nghiệp chế tạo máy. Chính vì thế áp dụng phương pháp tiện CNC để đáp ứng được nhu cầu của thị trường và giảm tỷ lệ hư hỏng sản phẩm, làm tăng độ phức tạp của quá trình gia công. Mác EN19 là loại thép hợp kim, có ứng dụng rộng rãi trong ngành tự động hóa và máy công cụ. Tối ưu các hệ số ảnh hưởng đến quá trình gia công là một bước quan trọng để thu được sản phẩm chất lượng.

Trong phần này, ta bàn đến vấn đề tối ưu các hệ số trong quá trình tiện trên máy CNC sử dụng mác thép EN19. Số thí nghiệm được thiết kế dựa trên dạng quy hoạch hỗn hợp đối xứng bậc 2 dạng FCCCD (Face-Centered Central Composite Design) với 3 nhân tố độc lập: tốc độ cắt, lượng ăn dao, chiều sâu cắt. Sau khi thực hiện các thí nghiệm lặp, cơ tính ở bề mặt mẫu thử và tỷ lệ bóc vật liệu (MRR). Ảnh hưởng của các nhân tố lên tỷ lệ bóc tách vật liệu và cơ tính bề mặt chi tiết trực tiếp được xác định bằng phân tích phương sai (ANOVA)

4.2 Các nhân tố đầu vào, đầu ra, miền giá trị

No	Nhân tố	-1	0	1
1	Tốc độ cắt (vòng/phút)	700	800	900
2	Lượng ăn dao (mm/vòng)	0,03	0,06	0,09
3	Chiều sâu cắt (mm)	1,6	1,8	2,0

4.3 Dạng ma trận quy hoạch thực nghiệm, số thí nghiệm lặp, kết quả thực nghiệm

S.NO	Tốc độ cắt	Lượng ăn dao	Chiều sâu cắt	Tốc độ (rpm)	Lượng ăn dao (mm/rev)	Chiều sâu cắt (mm)	MRR (mm ³ /min)	Roughness
1	-1	-1	-1	700	0.03	1.6	1158.07	2.914
2	1	-1	-1	900	0.03	1.6	1401.88	2.539
3	-1	1	-1	700	0.09	1.6	3919.64	2.360
4	1	1	-1	900	0.09	1.6	4439.29	3.238
5	-1	-1	1	700	0.03	2	1299.88	2.589
6	1	-1	1	900	0.03	2	2022.04	3.197
7	-1	1	1	700	0.09	2	4740.03	3.237

8	1	1	1	900	0.09	2	5738.22	1.725
9	-1	0	0	700	0.06	1.8	2196.35	2.190
10	1	0	0	900	0.06	1.8	4485.51	3.023
11	0	-1	0	800	0.03	1.8	1728.57	2.917
12	0	1	0	800	0.09	1.8	5397.81	1.915
13	0	0	-1	800	0.06	1.6	2781.40	2.380
14	0	0	1	800	0.06	2	3639.67	2.274
15	0	0	0	800	0.06	1.8	4190.41	3.220
16	0	0	0	800	0.06	1.8	3639.67	2.523
17	0	0	0	800	0.06	1.8	3593.01	2.788
18	0	0	0	800	0.06	1.8	3970.55	2.142
19	0	0	0	800	0.06	1.8	4163.02	2.692
20	0	0	0	800	0.06	1.8	3970.55	2.493

Số thí nghiệm lặp: 1

4.4 Xử lý kết quả thực nghiệm trên Minitab

a) Xử lý kết quả thực nghiệm của hệ số tỷ lệ bóc tách vật liệu (MRR)

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3802	146	26.00	0.000	
x1	477	135	3.55	0.005	1.00
x2	1662	135	12.36	0.000	1.00
x3	374	135	2.78	0.019	1.00
x1*x1	-283	257	-1.10	0.296	1.82
x2*x2	-61	257	-0.24	0.818	1.82
x3*x3	-413	257	-1.61	0.138	1.82
x1*x2	69	150	0.46	0.656	1.00
x1*x3	120	150	0.80	0.445	1.00
x2*x3	170	150	1.13	0.286	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
425.369	94.94%	90.38%	69.47%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	33925251	3769472	20.83	0.000
Linear	3	31314121	10438040	57.69	0.000
x1	1	2278124	2278124	12.59	0.005
x2	1	27637566	27637566	152.75	0.000
x3	1	1398431	1398431	7.73	0.019
Square	3	2228305	742768	4.11	0.039
x1*x1	1	220170	220170	1.22	0.296
x2*x2	1	10130	10130	0.06	0.818
x3*x3	1	469853	469853	2.60	0.138
2-Way	3	382825	127608	0.71	0.570
Interaction					
x1*x2	1	38070	38070	0.21	0.656
x1*x3	1	114455	114455	0.63	0.445
x2*x3	1	230300	230300	1.27	0.286
Error	10	1809387	180939		
Lack-of-Fit	5	1486597	297319	4.61	0.060

Pure Error	5	322790	64558
Total	19	35734638	

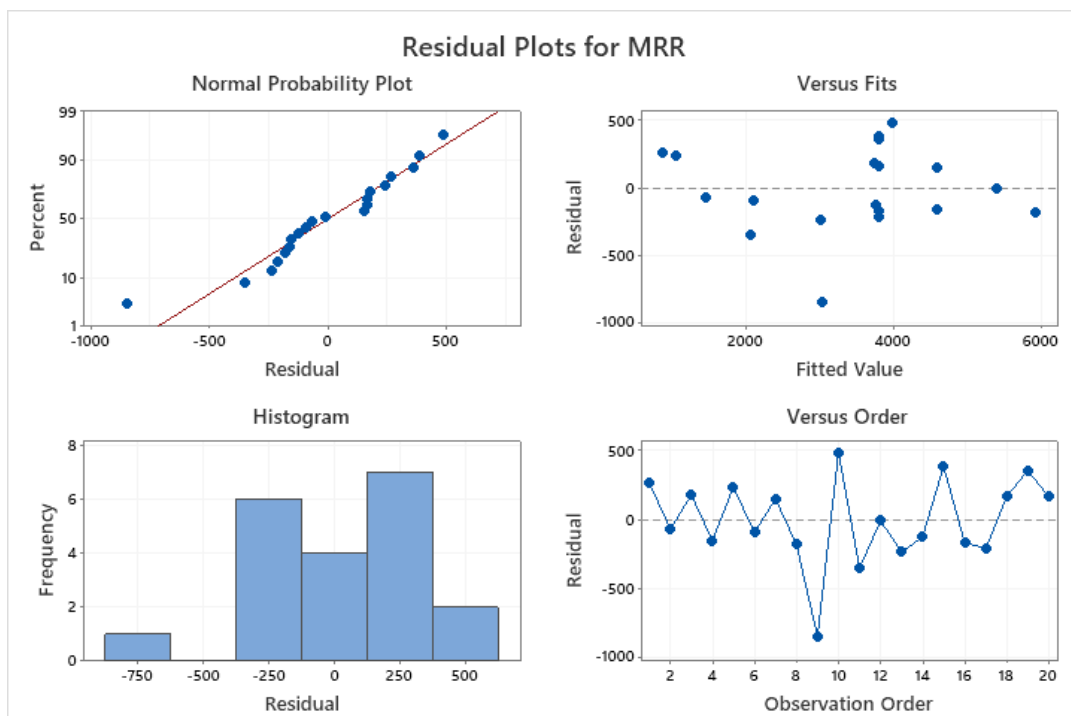
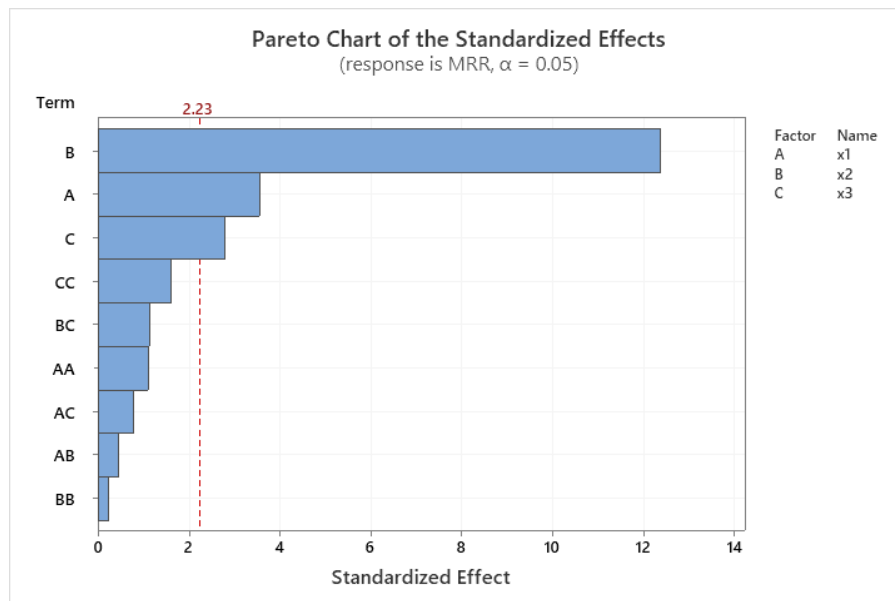
Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{MRR} = & -45770 + 37.9 x_1 - 5789 x_2 + 32590 x_3 - 0.0283 x_1^2 x_1 - 67435 x_2^2 x_2 \\ & - 10334 x_3^2 x_3 \\ & + 23.0 x_1 x_2 + 5.98 x_1 x_3 + 28278 x_2 x_3 \end{aligned}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

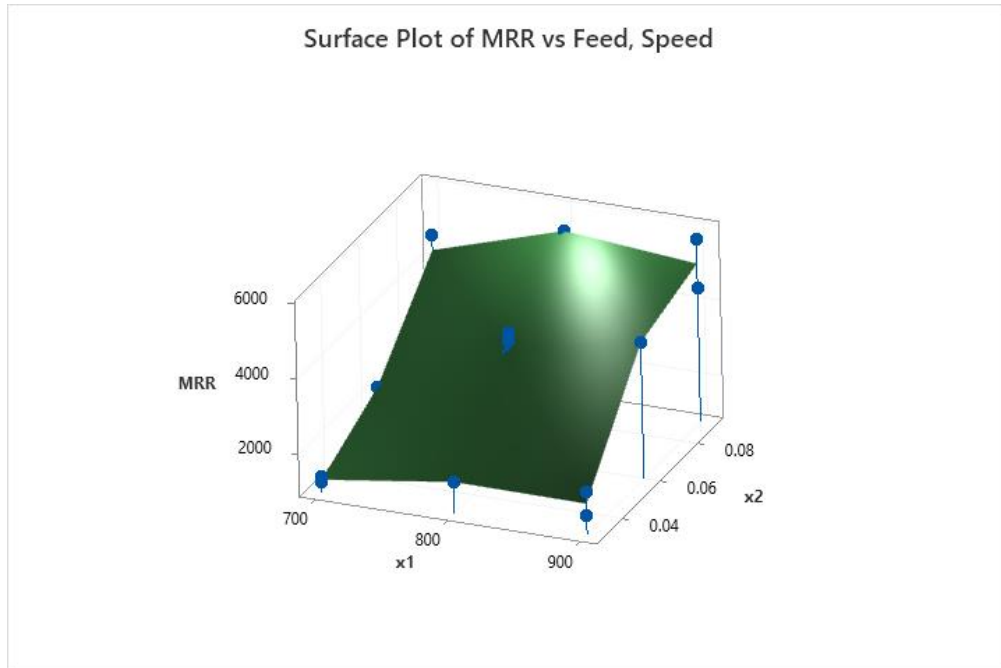
Obs	MRR	Fit	Resid	Std Resid
9	2196	3042	-846	-2.79 R

R Large residual

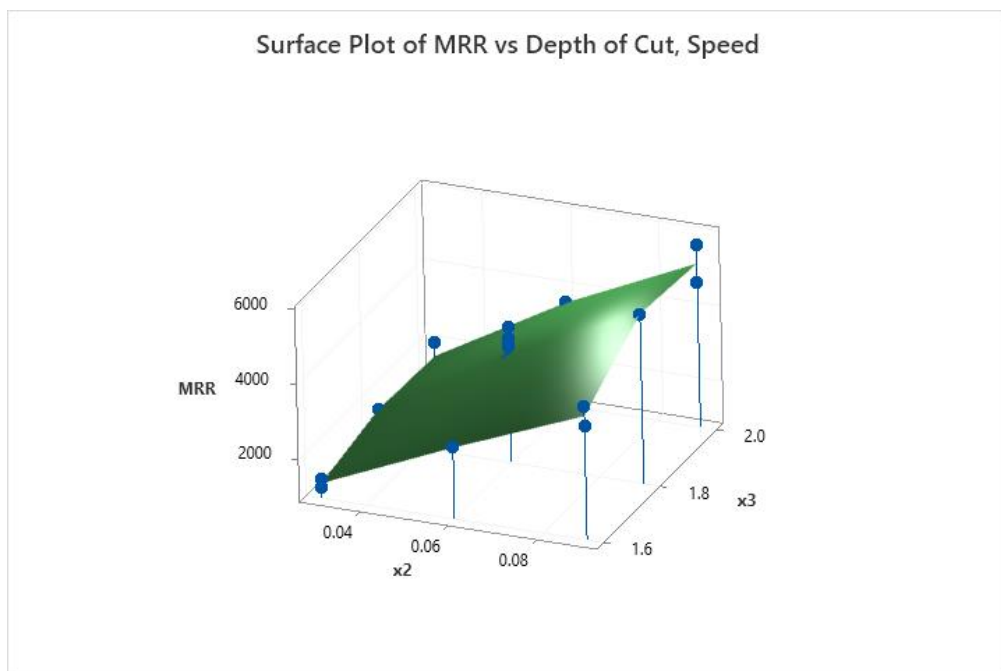


+ Trong hình 'Normal Probability Plot', ta thấy phương trình hồi quy là đáng tin cậy vì các điểm phân phối nằm trên (gần) đường hồi quy

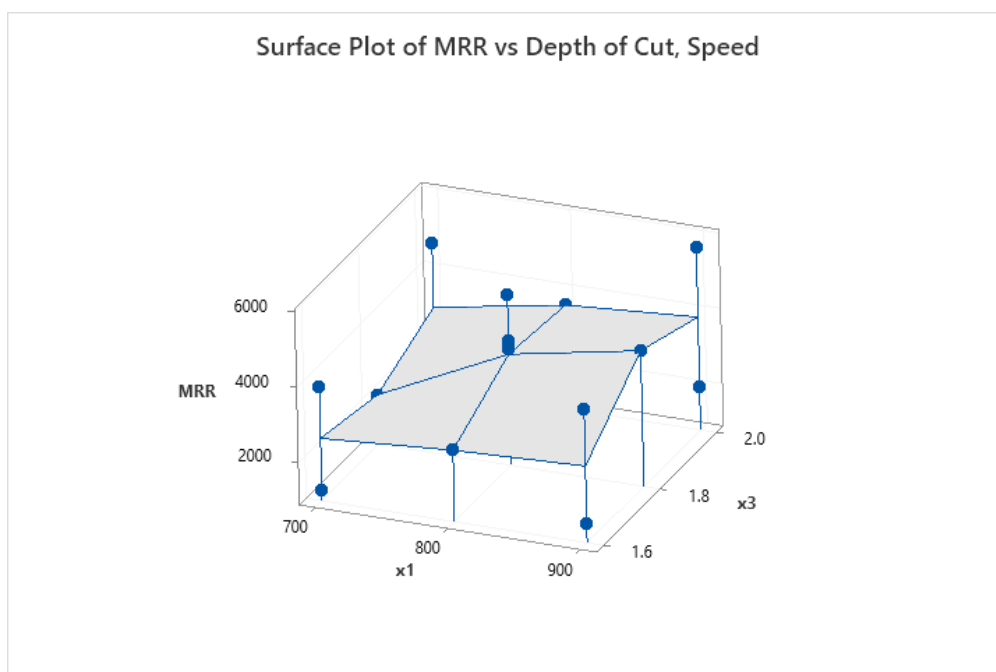
Đồ thị bề mặt đáp ứng



+ Hình trên chỉ ra rằng: nếu tăng tốc độ cắt sẽ dẫn đến sự tăng lên của tỷ lệ bóc tách vật liệu phôi. Nếu lượng ăn dao tăng, tỷ lệ bóc tách vật liệu (MRR) cũng tăng theo. Tỷ lệ bóc tách vật liệu lớn nhất cho thấy trên đồ thị là 800 (vòng/phút) và 0,08 mm/phút. Tỷ lệ bóc tách vật liệu nhỏ nhất trên đồ thị là 700 (vòng/phút) và 0,06 mm/phút



+ Hình trên cho thấy: nếu lượng ăn dao tăng lên thì theo tỷ lệ MRR cũng tăng theo. Nếu chiều sâu cắt tăng lên, MRR cũng tăng lên tới một giá trị cho phép rồi duy trì ổn định. Giá trị MRR tối thiểu được tính đến khi lượng ăn dao và chiều sâu cắt là nhỏ nhất



+ Hình trên chỉ ra rằng: nếu tốc độ cắt tăng lên, thì tỷ lệ bóc tách vật liệu sẽ không thay đổi nhiều, nhưng nếu chiều sâu cắt tăng lên thì tỷ lệ bóc tách vật liệu tăng lên đến một giá trị giới hạn rồi duy trì cố định

b) Xử lý kết quả thực nghiệm của hệ số độ cứng

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.547	0.185	13.80	0.000	
x1	0.043	0.170	0.25	0.804	1.00
x2	-0.168	0.170	-0.99	0.346	1.00
x3	-0.041	0.170	-0.24	0.815	1.00
x1*x1	0.204	0.324	0.63	0.543	1.82
x2*x2	0.013	0.324	0.04	0.968	1.82
x3*x3	-0.076	0.324	-0.23	0.820	1.82
x1*x2	-0.108	0.190	-0.57	0.581	1.00
x1*x3	-0.176	0.190	-0.93	0.376	1.00
x2*x3	-0.121	0.190	-0.64	0.538	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.536943	24.43%	0.00%	0.00%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.93224	0.103583	0.36	0.931
Linear	3	0.31797	0.105989	0.37	0.778
x1	1	0.01866	0.018662	0.06	0.804
x2	1	0.28258	0.282576	0.98	0.346

x3	1	0.01673	0.016728	0.06	0.815
Square	3	0.15549	0.051830	0.18	0.908
x1*x1	1	0.11444	0.114444	0.40	0.543
x2*x2	1	0.00050	0.000501	0.00	0.968
x3*x3	1	0.01568	0.015676	0.05	0.820
2-Way	3	0.45879	0.152929	0.53	0.672
Interaction					
x1*x2	1	0.09396	0.093961	0.33	0.581
x1*x3	1	0.24746	0.247456	0.86	0.376
x2*x3	1	0.11737	0.117370	0.41	0.538
Error	10	2.88307	0.288307		
Lack-of-Fit	5	2.23882	0.447764	3.48	0.099
Pure Error	5	0.64426	0.128851		
Total	19	3.81532			

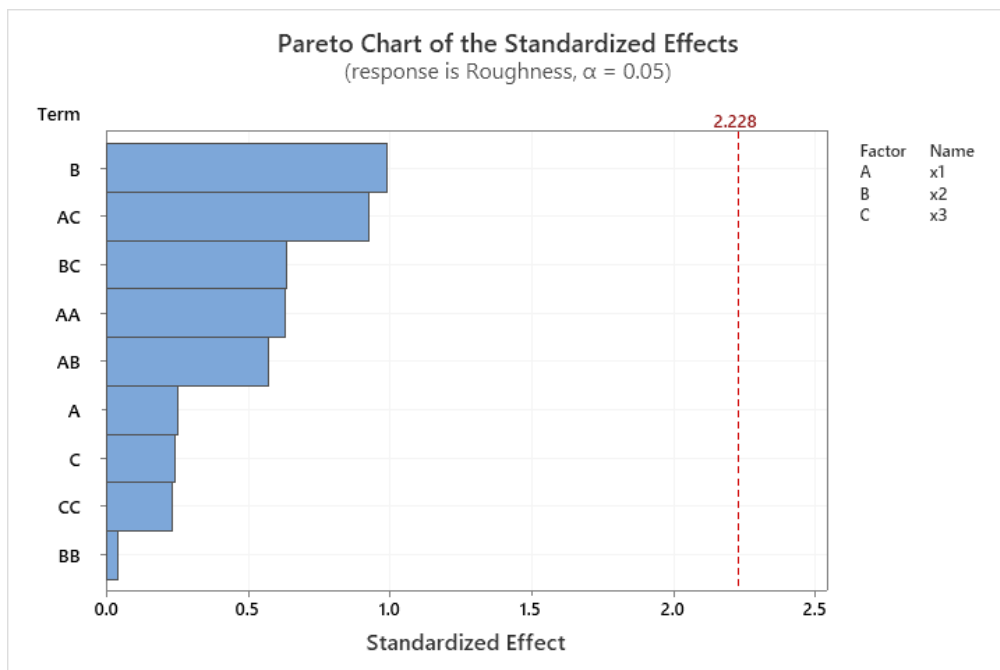
Regression Equation in Uncoded Units

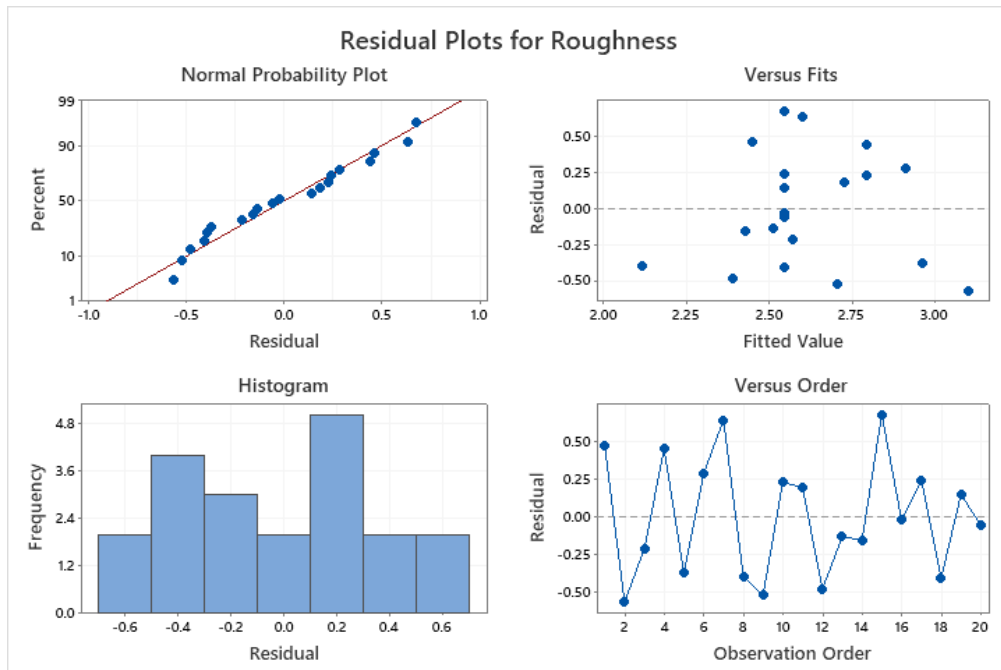
Roughness = -6.7 - 0.0142 x1 + 57.8 x2 + 14.8 x3 + 0.000020 x1*x1 + 15 x2*x2
 - 1.89 x3*x3
 - 0.0361 x1*x2 - 0.00879 x1*x3 - 20.2 x2*x3

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Roughness	Fit	Resid	Std Resid
2	2.539	3.104	-0.565	-2.31 R
7	3.237	2.600	0.637	2.61 R

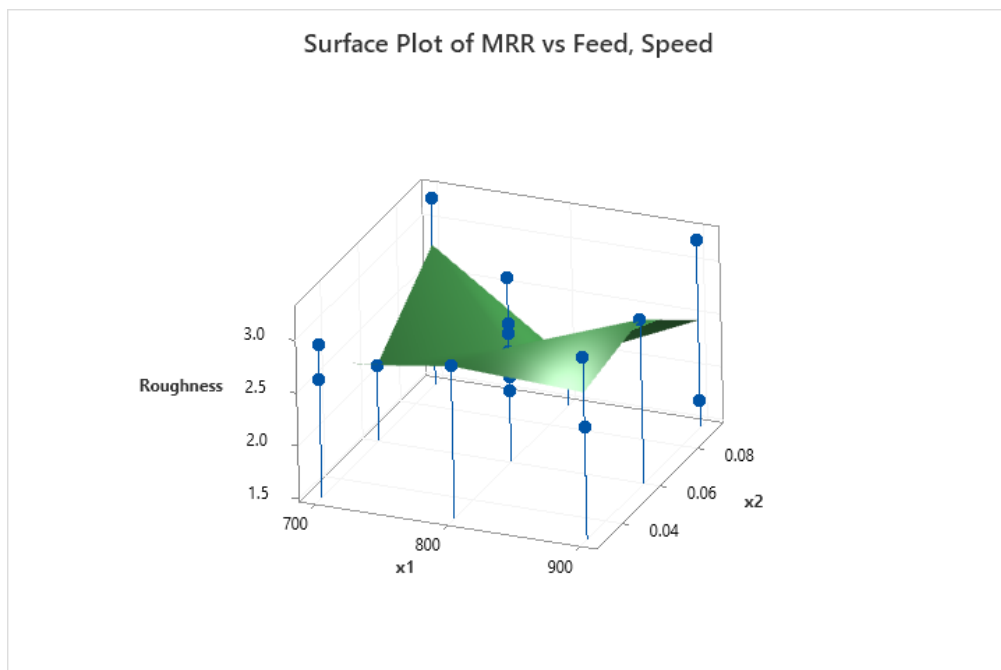
R Large residual



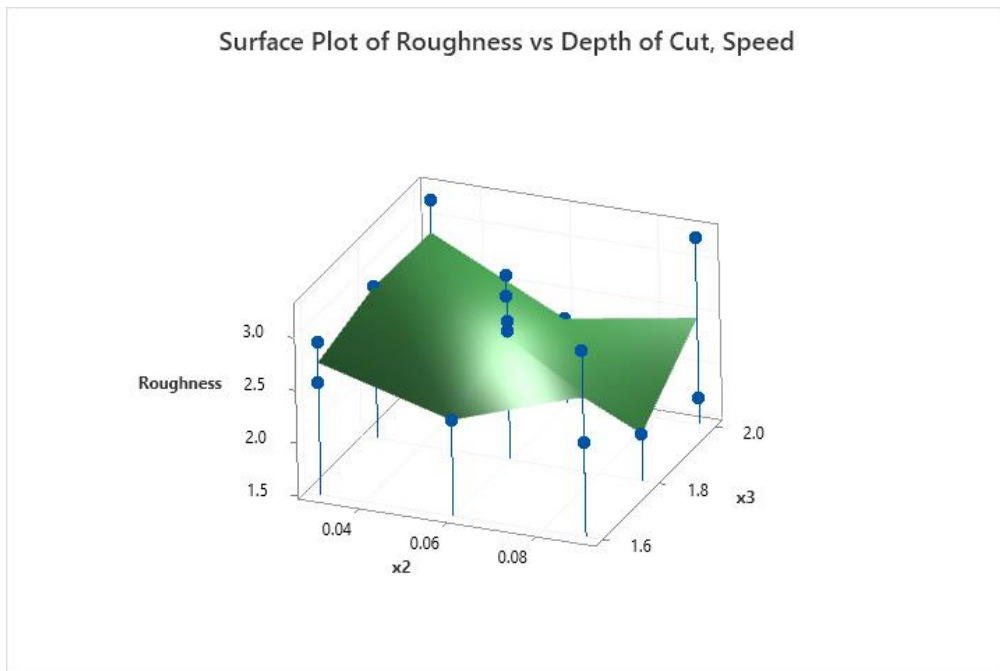


+ Trong hình 'Normal Probability Plot', ta thấy phương trình hồi quy là đáng tin cậy vì các điểm phân phối nằm trên (gần) đường hồi quy

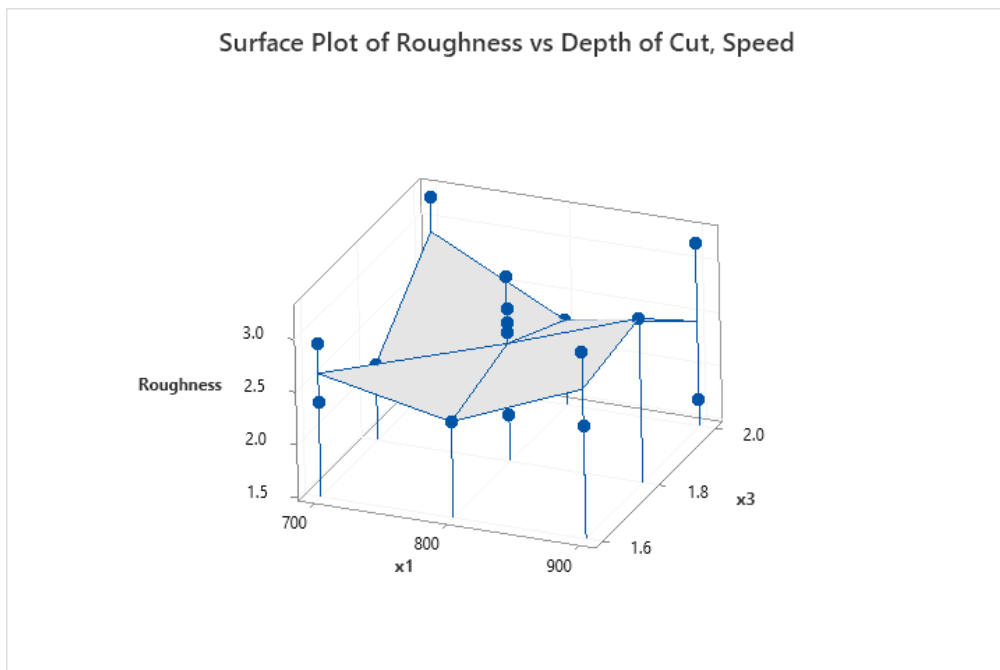
Đồ thị bề mặt đáp ứng



+ Hình trên chỉ ra rằng: chất lượng bề mặt phôi thu được lớn nhất khi ta gia công sản phẩm với tốc độ nhỏ nhất kèm với lượng ăn dao lớn nhất. Nếu lượng ăn dao tăng lên thì chất lượng bề mặt phôi cũng sẽ tăng lên và giảm xuống khi đạt điểm giới hạn



+ Đồ thị trên cho ta thấy: nếu lượng ăn dao tăng lên thì chất lượng bề mặt phôi sẽ giảm xuống, sau đó dao động lên xuống. Nếu chiều sâu cắt tăng lên thì chất lượng bề mặt cũng tăng theo. Chất lượng bề mặt đạt giá trị lớn nhất khi đạt được trị số lượng ăn dao nhỏ và chiều sâu cắt lớn



+ Đồ thị trên cho ta thấy: chất lượng bề mặt gia công là nhỏ nhất khi tiên chi tiết với tốc độ thấp và chiều sâu cắt lớn. Nếu tăng tốc độ gia công tiện thì chất lượng bề mặt chi tiết sẽ giảm nhưng rồi lại tăng đồng nghĩa với việc chiều sâu cắt tăng thì chất lượng bề mặt gia công cũng tăng

c) Giá trị các nhân tố để thông số đầu ra đạt giá trị tối ưu

Parameters

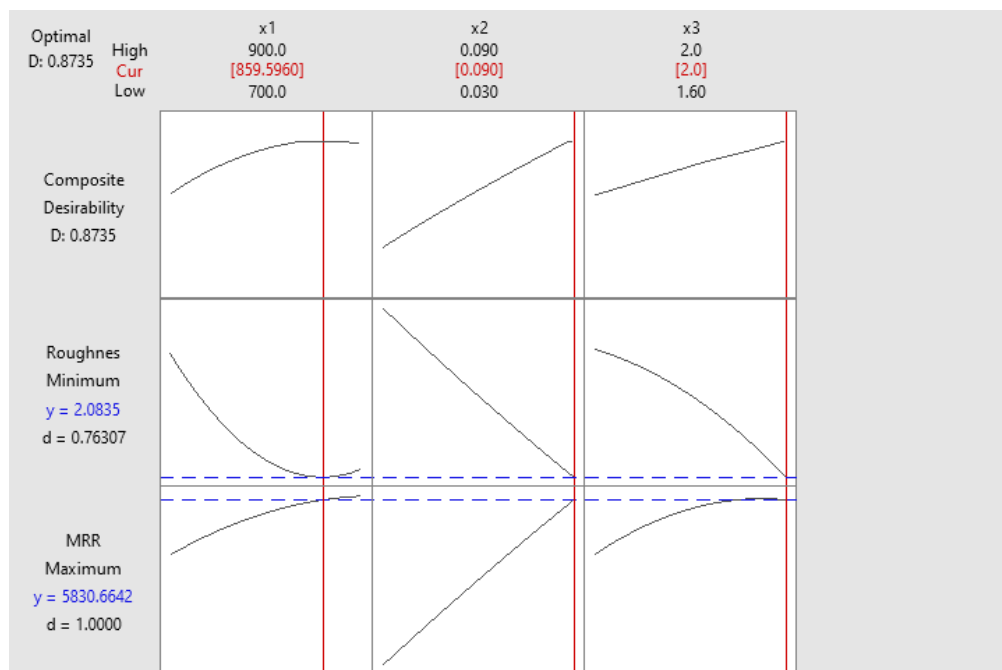
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Roughness	Minimum		1.73	3.238	1	1
MRR	Maximum	1158.07	5738.22		1	1

Solution

Solution	x1	x2	x3	Roughness Fit	MRR Fit	Composite Desirability
1	859.596	0.09	2	2.08347	5830.66	0.873540

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
x1	859.596			
x2	0.09			
x3	2			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Roughness	2.083	0.436	(1.111, 3.055)	(0.542, 3.625)
MRR	5831	346	(5061, 6601)	(4610, 7052)



d) Thao tác trên Minitab

Trên Stat -> DOE -> Response Surface -> Create Response Surface Design

Trên hộp thoại 'Create Response Surface Design', ta chọn dạng quy hoạch là hỗn hợp (Central Composite) với số nhân tố là 3

Chọn thẻ 'Display Available Designs'

Designs	Runs	Blocks	Center Points Total	Cube	Axial	Default Alpha
Full	20	1	6	0	0	1.682
Full	20	2	6	4	2	1.633
Full	20	3	6	4	2	1.633

Trên thẻ 'Design'

Design		Continuous Factors								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Central composite full	unblocked	13	20	31	52	90	152			
	blocked	14	20	30	54	90	160			
Central composite half	unblocked				32	53	88	154		
	blocked				33	54	90	160		
Central composite quarter	unblocked							90	156	
	blocked							90	160	
Central composite eighth	unblocked									158
	blocked									160
Box-Behnken	unblocked		15	27	46	54	62		130	170
	blocked			27	46	54	62		130	170

Trên thẻ 'Factors', ta chọn Level Define theo trục và nhập tên các nhân tố và mức giá trị

Factor	Name	Low	High
A	x1	700	900
B	x2	0.03	0.09
C	x3	1.6	2.0

Chọn thẻ 'Options'

Chọn thẻ 'Results'

Nhấn OK và nhập các kết quả thực nghiệm, ta được

Central Composite Design

Design Summary

Factors:	3	Replicates:	1
Base runs:	20	Total runs:	20
Base blocks:	1	Total blocks:	1

$\alpha = 1$

Two-level factorial: Full factorial

Point Types

Cube points:	8
Center points in cube:	6
Axial points:	6
Center points in axial:	0

Design Table (randomized)

Run	Blk	A	B	C
1	1	1	1	-1
2	1	0	0	0
3	1	0	-1	0
4	1	0	1	0
5	1	-1	0	0
6	1	0	0	0
7	1	-1	1	-1
8	1	1	-1	-1
9	1	0	0	-1
10	1	1	1	1
11	1	0	0	0
12	1	0	0	1
13	1	-1	1	1
14	1	0	0	0
15	1	0	0	0
16	1	-1	-1	-1
17	1	-1	-1	1
18	1	1	-1	1
19	1	1	0	0
20	1	0	0	0

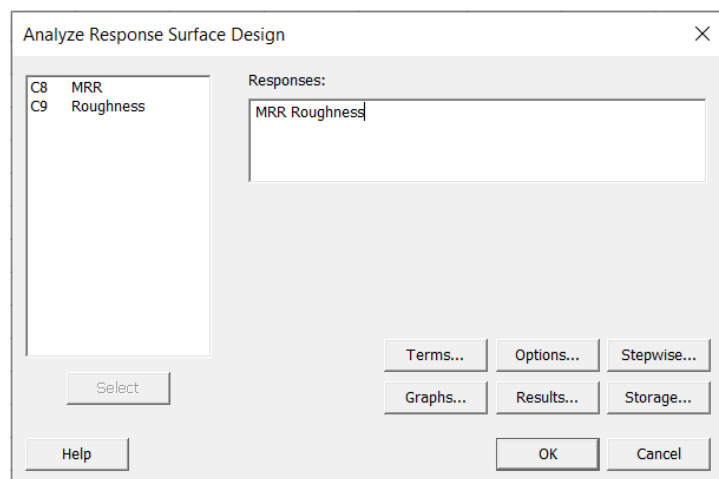
Lưu ý, khi nhập kết quả thực nghiệm, phải nhập đúng với thứ tự của ma trận quy hoạch

Trên bảng tính ta thu được

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	x1	x2	x3	MRR	Roughness
16	1	16	1	1	700	0.03	1.6	3639.67	2.523
17	5	17	1	1	700	0.03	2.0	3593.01	2.788
18	6	18	1	1	900	0.03	2.0	3970.55	2.142
19	10	19	-1	1	900	0.06	1.8	4163.02	2.692
20	18	20	0	1	800	0.06	1.8	3970.55	2.493

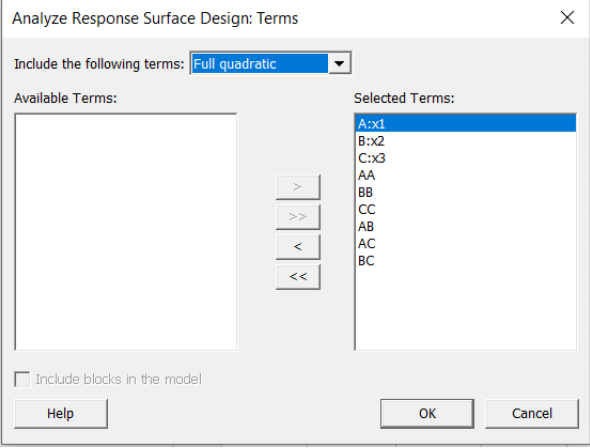
Tiếp theo, ta xử lý và phân tích kết quả thực nghiệm

Chọn Stat -> DOE -> Response Surface -> Analyze response surface design



Chọn thông số đầu ra và chọn 'Select'

Chọn thẻ 'Term'



Analyze Response Surface Design: Terms

Include the following terms: **Full quadratic**

Available Terms:

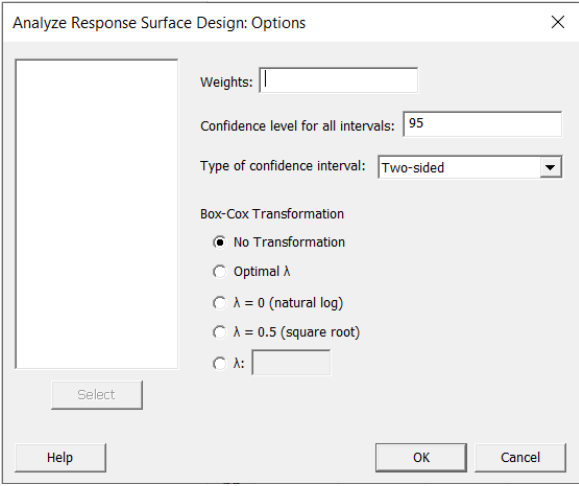
Selected Terms:

- A:x1
- B:x2
- C:x3
- AA
- BB
- CC
- AB
- AC
- BC

☐ Include blocks in the model

Help OK Cancel

Chọn thẻ 'Options'



Analyze Response Surface Design: Options

Weights: |

Confidence level for all intervals: 95

Type of confidence interval: Two-sided

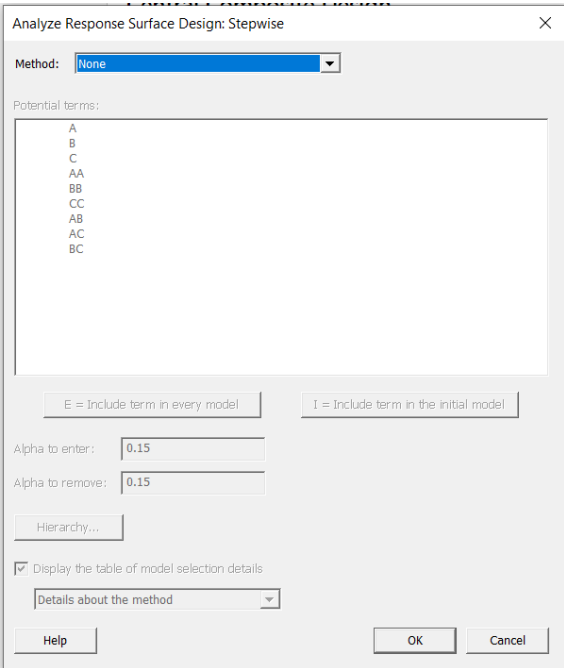
Box-Cox Transformation

- ☒ No Transformation
- ☐ Optimal λ
- ☐ $\lambda = 0$ (natural log)
- ☐ $\lambda = 0.5$ (square root)
- ☐ λ : |

Select

Help OK Cancel

Chọn thẻ 'Stepwise'



Analyze Response Surface Design: Stepwise

Method: **None**

Potential terms:

- A
- B
- C
- AA
- BB
- CC
- AB
- AC
- BC

E = Include term in every model I = Include term in the initial model

Alpha to enter: 0.15

Alpha to remove: 0.15

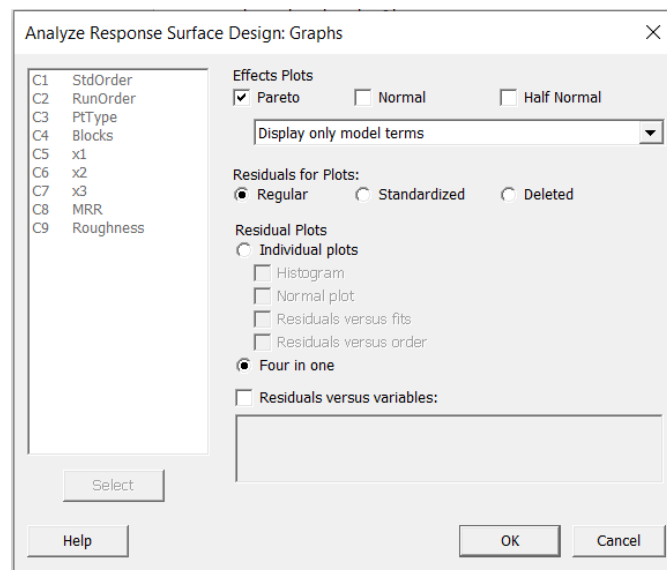
Hierarchy...

☒ Display the table of model selection details

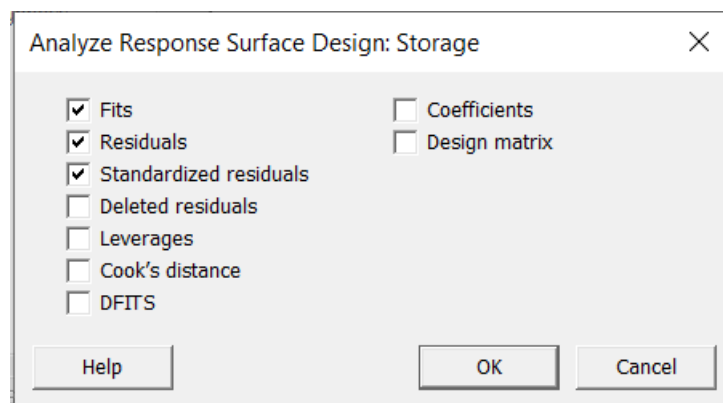
Details about the method

Help OK Cancel

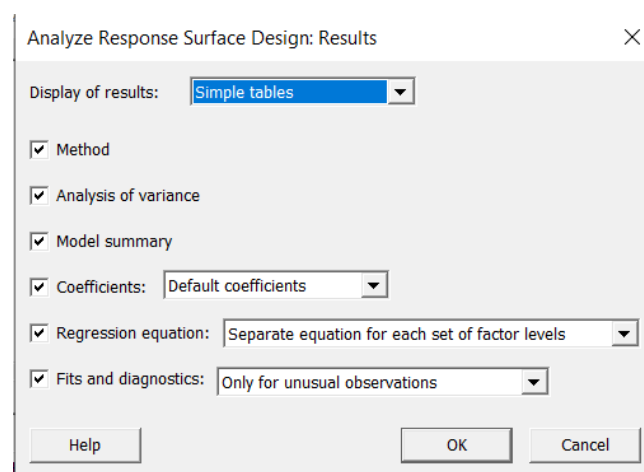
Chọn thẻ 'Graphs'



Chọn thẻ 'Results'



Chọn thẻ 'Storage'



4.5 So sánh kết quả bài báo với Minitab

So với kết quả bài báo, thông số xử lý trên Minitab là hoàn toàn phù hợp

Table 5: ANOVA analysis for Material removal rate

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	33925251	3769472	20.83	0.000
Linear	3	31314121	10438040	57.69	0.000
speed	1	2278124	2278124	12.59	0.005
feed	1	27637566	27637566	152.75	0.000
depth of cut	1	1398431	1398431	7.73	0.019
Square	3	2228305	742768	4.11	0.039
speed*speed	1	220170	220170	1.22	0.296
feed*feed	1	10130	10130	0.06	0.818
depth of cut*depth of cut	1	469853	469853	2.60	0.138
2-Way Interaction	3	382825	127608	0.71	0.570
speed*feed	1	38070	38070	0.21	0.656
speed*depth of cut	1	114455	114455	0.63	0.445
feed*depth of cut	1	230300	230300	1.27	0.286
Error	10	1809387	180939		
Lack-of-Fit	5	1486597	297319	4.61	0.060
Pure Error	5	322790	64558		
Total	19	35734638			

Table 6: ANOVA for roughness

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.93224	0.103583	0.36	0.931
Linear	3	0.31797	0.105989	0.37	0.778
speed	1	0.01866	0.018662	0.06	0.804
feed	1	0.28258	0.282576	0.98	0.346
depth of cut	1	0.01673	0.016728	0.06	0.815
Square	3	0.15549	0.051830	0.18	0.908
speed*speed	1	0.11444	0.114444	0.40	0.543
feed*feed	1	0.00050	0.000501	0.00	0.968
depth of cut*depth of cut	1	0.01568	0.015676	0.05	0.820
2-Way Interaction	3	0.45879	0.152929	0.53	0.672
speed*feed	1	0.09396	0.093961	0.33	0.581
speed*depth of cut	1	0.24746	0.247456	0.86	0.376
feed*depth of cut	1	0.11737	0.117370	0.41	0.538
Error	10	2.88307	0.288307		
Lack-of-Fit	5	2.23882	0.447764	3.48	0.099
Pure Error	5	0.64426	0.128851		
Total	19	3.81532			

4.6 Nhận xét chung

+ Từ bảng kết quả phân tích ANOVA cho tỷ lệ vật liệu bị loại bỏ, cho giá trị $P_value = 0 < 0,05$ tương đương với giá trị $R_Square = 94,94\%$ nên bộ dữ liệu là đáng tin cậy

+ Giá trị “Mức độ không phù hợp – Lack of Fit” có $P_Value = 0,06 > 0,05$ nên hệ số này không có ý nghĩa

⇒ Lượng ăn dao có ảnh hưởng lớn hơn so với tốc độ cắt và chiều sâu cắt

+ Từ bảng kết quả phân tích ANOVA cho độ cứng, cho giá trị $P_Value = 0,931 > 0,05$ tương đương với giá trị $R_Square = 24,43\%$ vì thế không phù hợp với bộ dữ liệu

+ Vậy, việc ứng dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc 2 (Response Surface Method) trong việc tối ưu các chỉ số tỷ lệ bóc tách vật liệu (MRR) và chất lượng bề mặt chi tiết để chọn phôi, dụng cụ gia công và các hệ số khác rất thích hợp

+ Bằng cách phân tích phương sai (ANOVA) cho tỷ lệ bóc tách vật liệu, ta thấy yếu tố lượng ăn dao chiếm phần quan trọng hơn tốc độ gia công và chiều sâu cắt và việc phân tích phương sai cũng được thực hiện tương tự để khảo sát chất lượng bề mặt chi tiết, từ đó, phương trình hồi quy được đưa ra để tính các giá trị MRR và chất lượng bề mặt chi tiết phụ thuộc vào 5 nhân tố