

OPTIMASI PARAMETER LONGITUDINAL VIBRATION ASSISTED TURNING (VAT) UNTUK MEMINIMALKAN SURFACE ROUGHNESS DAN CUTTING TEMPERATURE MENGGUNAKAN METODE RSM

OPTIMIZATION OF LONGITUDINAL VIBRATION ASSISTED TURNING (VAT) PARAMETERS TO MINIMIZE SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING TEMPERATURE USING RSM METHOD

Anak Agung Sri Nandini¹, Rino Andias Anugraha², Teddy Sjafrizal³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom
¹asrinand.student@telkomuniversity.ac.id, ²rinoandias@telkomuniveristy.co.id,
³teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Penggunaan material substrat baru berbahan campuran aluminium, magnesium, titanium, bahkan keramik yang sulit untuk dipermesinkan karena sifatnya yang keras dan getas, hal ini menjadi tantangan bagi industri manufaktur. Berbagai penelitian dilakukan hingga ditemukan bahwa untuk mendapatkan hasil pemotongan yang baik pada material getas, permesinan dapat dilakukan dengan ductile mode. Permesinan ductile mode menggunakan kedalaman makan yang sangat kecil sehingga memerlukan waktu yang banyak dan tentunya mengakibatkan biaya yang lebih besar. Teknologi Vibration Assisted Turning (VAT) kemudian ditemukan sebagai alternatif karena mampu menghasilkan pemotongan ductile mode pada kedalaman makan lebih besar. Namun untuk kualitas yang lebih baik pertimbangan yang bijak memilih kombinasi parameter yang tepat harus dilakukan. Maka dari itu penting dilakukan proses optimasi. Studi ini menyelesaikan optimasi parameter Longitudinal VAT untuk meminimalkan surface roughness dan cutting temperature menggunakan metode RSM. Eksperimen berdasarkan RSM dilakukan dan parameter optimal telah didapat, disamping itu model prediksi yang akurat berhasil diformulasikan dan dapat digunakan untuk mempermudah pengaplikasian Longitudinal VAT ke depannya.

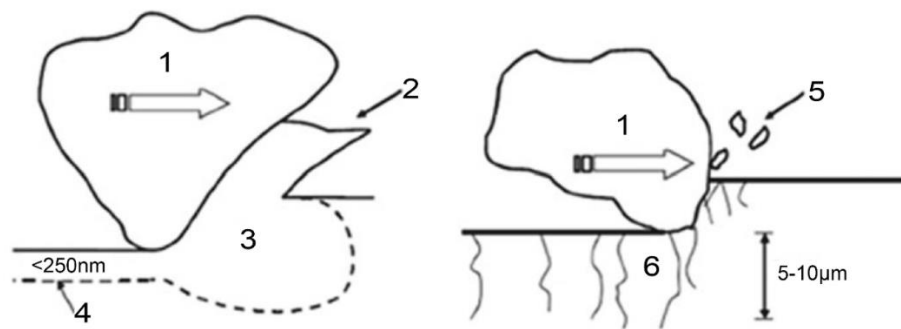
Abstract

The use of new substrate materials made from aluminum, magnesium, titanium, and even ceramics alloy that are difficult to process because of their hard and brittle nature, this is a challenge for the manufacturing industry. Various studies were carried out until it was found that to get good cutting results on brittle material, machining can be done with ductile mode. Ductile mode machining uses a very small depth of cut so it requires a lot of time and of course results in higher costs. Vibration Assisted Turning (VAT) technology was later found as an alternative because it was able to produce ductile mode cuts at greater depth of cut. But for better quality a wise consideration should be given to choosing the right combination of parameters. Therefore, it was important to do the optimization process. This study completed the optimization of the VAT Longitudinal parameters to minimize surface roughness and cutting temperature using the RSM method. Experiments based on RSM were carried out and optimal parameters were obtained, besides that an accurate prediction model was successfully formulated and could be used to facilitate the application of Longitudinal VAT in the future.

1. Pendahuluan

Pertumbuhan pasar part resisi antara lain dipicu pengembangan material substrat baru dan kemajuan teknologi permesinan [1]. Material substrat baru yang terus dikembangkan karena keunggulan kemampuan mekanik, ketahanan korosi dan bobotnya yang ringan antara lain adalah campuran aluminium, magnesium, titanium bahkan keramik. Jenis material tersebut cenderung memiliki sifat keras dan getas yang sulit untuk diproses menggunakan permesinan konvensional.

Material keras dan getas jika diproses menggunakan permesinan cenderung menghasilkan bentuk geram yang dapat melukai permukaan benda kerja. Berbagai studi dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut hingga ditemukan bahwa pemotongan material getas dapat dilakukan dalam *ductile mode* pada kondisi tertentu [2]. Untuk mencapai pemotongan *ductile mode*, kedalaman makan yang digunakan harus di bawah ketebalan kritis chip yang tidak terdeformasi seperti ditunjukkan pada gambar 1 [3].



Gambar 1 Pemotongan ductile mode dan brittle mode. Pada titik kedalaman tertentu pemotongan menghasilkan geram terputus-putus dan menyebabkan permukaan terluka.

Pemotongan menggunakan *ductile mode* membutuhkan kedalaman makan yang sangat kecil pada permesinan konvensional sehingga akan memakan banyak waktu. Sebagai alternatif, Moriwaki [4] menemukan bahwa pemotongan ductile mode dapat dicapai menggunakan kedalaman makan lebih besar dengan cara mengaplikasikan getaran ultrasonik pada permesinan khususnya turning. Alternatif tersebut kemudian disebut *Vibration Assisted Turning* (VAT).

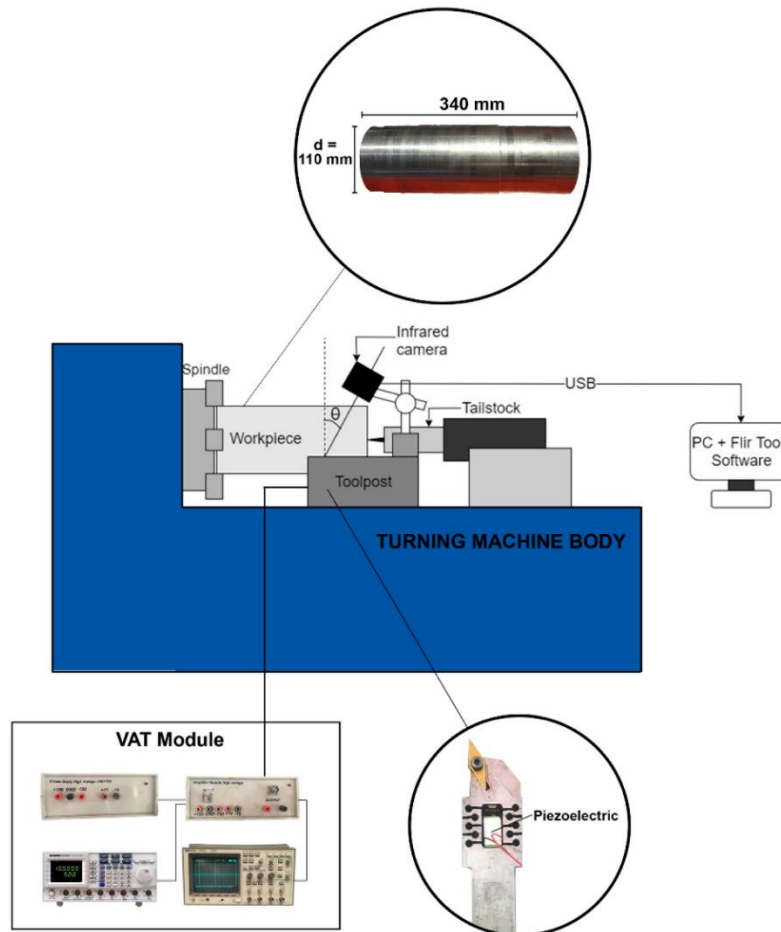
Proses VAT pada material campuran dengan bahan dasar titanium terbukti menghasilkan kekasaran permukaan (Ra) hingga 50% lebih baik dibandingkan *conventional turning* [5]. Hasil eksperimen oleh Patil [5] menunjukkan cutting temperature pada permesinan VAT lebih rendah daripada *conventional turning* (pada cutting speed di atas 10 m/min). Cutting temperature yang rendah baik karena dapat memperpanjang umur pahat dan penghematan penggunaan pelumasan yang mencemari lingkungan.

Meskipun telah terbukti mampu menghasilkan kekasaran permukaan lebih baik dan cutting temperature lebih rendah, namun kondisi pemotongan selama proses perlu disesuaikan untuk memaksimalkan hasil yang dicapai. Proses VAT dipengaruhi beberapa faktor antara lain faktor permesinan (spindle speed, feed rate, depth of cut) dan faktor getaran (frekuensi dan amplitude). Tiap faktor memberi pengaruh yang berbeda terhadap hasil, mendapatkan hasil yang maksimal tidak bisa hanya dengan mempertimbangkan salah satu faktor, oleh karena itu proses optimasi penting dilakukan.

Menimbang perlu dilakukannya optimasi, maka optimasi parameter permesinan untuk meminimalkan surface roughness dan cutting temperature dilakukan menggunakan metode RSM pada studi ini. Metode RSM digunakan karena mampu menghasilkan design of experiment yang efisien sehingga studi tidak akan menghabiskan banyak waktu dan biaya. Disamping optimasi, RSM juga mampu menghasilkan model matematis yang dapat digunakan untuk memprediksi hasil permesinan berdasarkan parameter input yang diinginkan. Model matematis akan berguna dalam pengaplikasian proses atau sistem baru seperti VAT karena operator belum banyak memiliki pengalaman tentang proses ini.

2. Set-up Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan benda kerja berupa aluminium 6061 dengan diameter 110 mm, dan panjang 340 mm. Sebelum eksperimen dilakukan, benda kerja diproses permesinan menggunakan spindle speed 635 rpm, feed rate 0.05 mm/rev dan kedalaman makan 0,1 mm. Eksperimen menggunakan mesin WINHO S530x1000, pahat insert berbahan TiN cemented carbide (VBMT 160404) yang diproduksi oleh Mitsubishi. Gambar berikut menunjukkan set up eksperimen yang dilakukan.



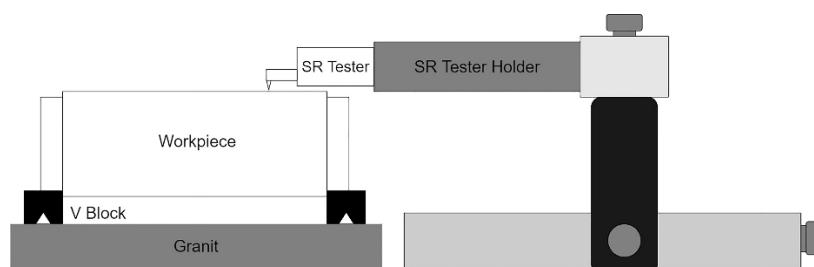
Gambar 2 Skema Set-up Eksperimen

Desain eksperimen berdasarkan RSM dengan pemilihan faktor dan level disesuaikan dengan kemampuan mesin yang digunakan. Tabel 1 menunjukkan faktor yang dipertimbangkan dan masing-masing level.

Tabel 1 Faktor dan Level

Level	Parameter			
	S (rpm)	F (mm/rev)	DoC (mm)	Freq. (KHz)
1	635	0.17	0.1	18
2	855	0.21	0.15	20
3	1350	0.24	0.2	22

Pengukuran cutting temperature dilakukan selama proses eksperimen dengan menggunakan kamera inframerah (FLIR E6 + Flir Tools). Kamera inframerah diposisikan dengan kemiringan tertentu terhadap objek ($45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$). Hal ini dilakukan untuk menghindari terhalangnya gambar dari chip. Pengaturan kamera inframerah menggunakan emissivity sebesar 0,41 dan suhu atmosfer diupdate setiap satu proses eksperimen akan dilaksanakan.

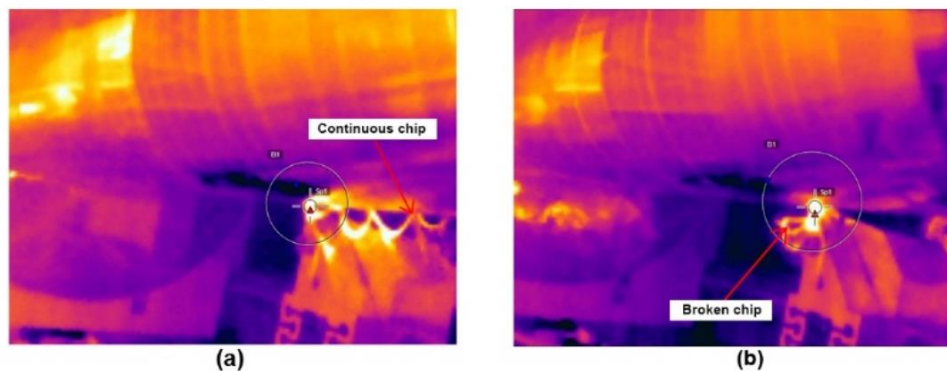


Gambar 3 Skema pengukuran surface roughness. Workpiece diletakan di atas granit untuk memastikan permukaan datar sehingga tidak akan merusak alat ukur.

Proses pengukuran surface roughness dengan stylus (Mitutoyo SJ-410) dilakukan setelah eksperimen diselesaikan. Pengukuran satu standard order dilakukan sebanyak tiga kali replikasi pada sisi berbeda kemudian hasil rata-rata replikasi tersebut digunakan sebagai data respon.

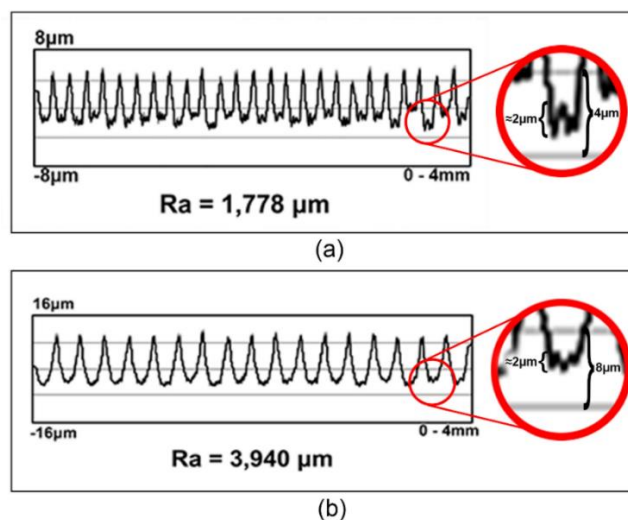
3. Hasil Eksperimen dan Pembahasan

Proses eksperimen bersamaan dengan pengambilan data temperatur pemotongan menggunakan kamera inframerah. Rekaman layar kamera inframerah pada saat pengukuran beberapa sampel ditunjukkan sebagai berikut.



Gambar 4 Tangkapan layar pengukuran suhu (a) standard order 6; (b) standard order 8. Terdapat perbedaan bentuk chip pada kedalaman makan yang berbeda.

Jika diperhatikan tangkapan layar standard run 6 menunjukkan bahwa bentuk chip yang dihasilkan pada permesinan adalah berkelanjutan (continuous) sedangkan pada standard run 8 bentuk chip patah-patah (broken). Standard run 6 dan 8 menggunakan kondisi permesinan dengan *spindle speed* 855 rpm, *feed rate* 0,21 mm/rev dan frekuensi 22 KHz mm. Perbedaannya standard run 6 menggunakan kedalaman makan 0,1 mm sedangkan standard run 8 menggunakan kedalaman makan 0,2 mm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman makan yang digunakan maka mode pemotongan semakin mendekati brittle mode.



Gambar 5 Hasil pengukuran kekasaran permukaan (a) replikasi ketiga standard run 23; (b) replikasi ketiga standard run 14. Terdapat jejak getaran berukuran sesuai dengan besar amplitudo yang diaplikasikan ($\approx 2\mu\text{m}$).

Getaran ultrasonik yang diaplikasikan pada pahat potong meninggalkan jejak pada permukaan benda kerja. Hal ini terlihat pada hasil pengukuran kekasaran permukaan menggunakan stylus yang disajikan pada gambar berikut. Jika diperhatikan dengan seksama pada lembah-lembah permukaan terdapat jejak getaran yang berukuran mendekati $2\mu\text{m}$, hal ini sesuai dengan amplitudo getaran yang diaplikasikan pada pahat potong.

Eksperimen telah dilaksanakan sesuai dengan desain eksperimen, tabel berikut merupakan data hasil eksperimen yang telah dilaksanakan.

Tabel 2 Hasil Eksperimen

Std Run	Spindle speed (rpm)	Feed rate (mm/rev)	Frequency (KHz)	DoC (mm)	Responses	
					Ra (μm)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)
1	635	0.17	20	0.15	1.886	78.61
2	1350	0.17	20	0.15	2.266	78.97
3	635	0.24	20	0.15	3.650	74.73
4	1350	0.24	20	0.15	3.850	85.88
5	855	0.21	18	0.1	3.450	78.67

6	855	0.21	22	0.1	3.630	78.01
7	855	0.21	18	0.2	3.100	85.09
8	855	0.21	22	0.2	3.579	84.81
9	635	0.21	20	0.1	3.751	71.54
10	1350	0.21	20	0.1	3.005	85.32
11	635	0.21	20	0.2	3.402	84.47
12	1350	0.21	20	0.2	3.661	83.47
13	855	0.17	18	0.15	1.758	82.86
14	855	0.24	18	0.15	3.948	85.10
15	855	0.17	22	0.15	1.640	79.26
16	855	0.24	22	0.15	4.357	82.60
17	635	0.21	18	0.15	3.328	70.41
18	1350	0.21	18	0.15	3.979	83.58
19	635	0.21	22	0.15	2.642	77.18
20	1350	0.21	22	0.15	3.296	92.41
21	855	0.17	20	0.1	1.982	78.45
22	855	0.24	20	0.1	4.393	76.29
23	855	0.17	20	0.2	1.795	86.26
24	855	0.24	20	0.2	4.684	88.09
25	855	0.21	20	0.15	3.414	77.92
26	855	0.21	20	0.15	3.394	78.06
27	855	0.21	20	0.15	3.375	76.50
28	855	0.21	20	0.15	3.103	74.92

Data yang dikumpulkan melalui proses eksperimen telah diproses menggunakan RSM. Proses optimasi RSM menghasilkan model prediksi, kelayakan model prediksi diuji menggunakan ANOVA dan Lack of Fit. Uji ANOVA dilakukan untuk mengetahui seberapa besar variasi respon yang dapat ditunjukkan oleh model yang dipilih sedangkan uji Lack of Fit untuk melihat besarnya ketidaksuaian antara prediksi dengan data aktual. Tabel 3 dan 4 berturut-turut merupakan hasil uji ANOVA dan Lack of Fit model prediksi surface roughness dan cutting temperature.

Tabel 3 Uji ANOVA Model Surface Roughness

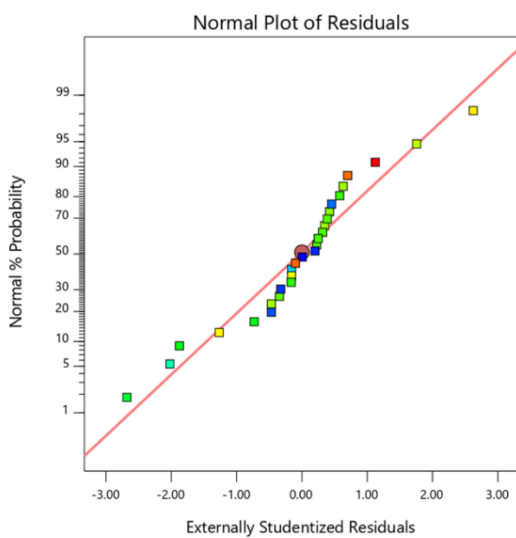
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	17,16	9	1,91	21,46	< 0,0001	significant
A-Spindle Speed	0,1715	1	0,1715	1,93	0,1816	
B-Feed Rate	7,66	1	7,66	86,26	< 0,0001	
C-Frequency	0,0147	1	0,0147	0,1652	0,6892	
D-Depth of Cut	7,259E-06	1	7,259E-06	0,0001	0,9929	
AB	0,0095	1	0,0095	0,1065	0,7479	
A ²	0,0057	1	0,0057	0,0642	0,8028	
B ²	0,1990	1	0,1990	2,24	0,1518	
D ²	0,2535	1	0,2535	2,85	0,1084	
A ² B	0,4129	1	0,4129	4,65	0,0449	
Residual	1,60	18	0,0888			
Lack of Fit	1,53	15	0,1023	4,76	0,1123	not significant
Pure Error	0,0645	3	0,0215			
Cor Total	18,76	27				

Tabel 4 Hasil Uji ANOVA Model Cutting Temperature

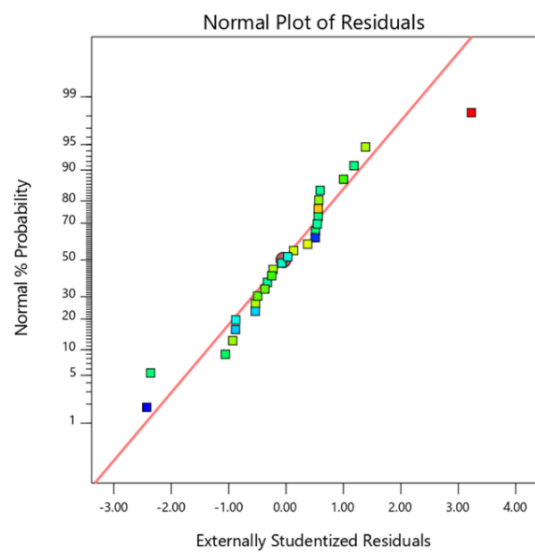
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	545.93	8	68.24	7.72	0.0001	significant
A-Spindle Speed	236.07	1	236.07	26.69	< 0.0001	
B-Feed Rate	5.70	1	5.70	0.6449	0.4319	
C-Frequency	6.13	1	6.13	0.6935	0.4153	

D-Depth of Cut	75.02	1	75.02	8.48	0.0089	
AD	59.35	1	59.35	6.71	0.0180	
B ²	43.29	1	43.29	4.89	0.0394	
C ²	52.96	1	52.96	5.99	0.0243	
D ²	55.31	1	55.31	6.25	0.0217	
Residual	168.05	19	8.84			
Lack of Fit	161.61	16	10.10	4.70	0.1138	not significant
Pure Error	6.44	3	2.15			
Cor Total	713.98	27				

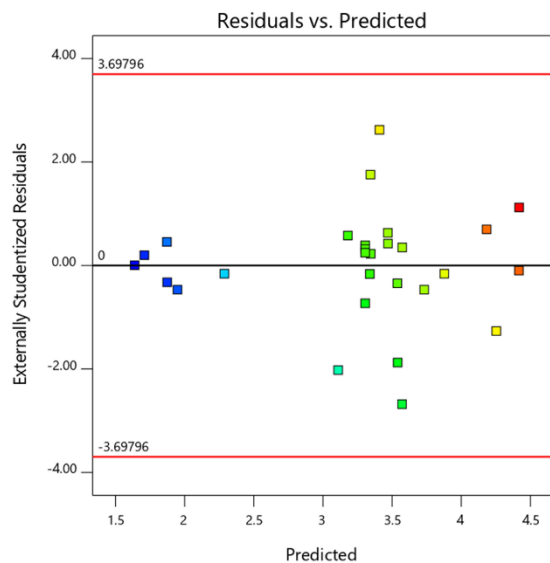
Hasil uji ANOVA model prediksi surface roughness dan cutting temperature mendapat nilai p-value berturut-turut sebesar <0,0001 dan 0,0001 yang artinya model secara signifikan mampu menunjukkan variasi respon. Sedangkan hasil uji Lack of Fit model prediksi surface roughness dan cutting temperature mendapat nilai p-value masing-masing sebesar 0,1123 dan 0,1138 artinya ketidakuaian yang terjadi antara hasil prediksi model dengan nilai aktual tidak signifikan. Berdasarkan hasil uji ANOVA dan Lack of Fit kedua model telah memadai untuk digunakan sebagai model prediksi.



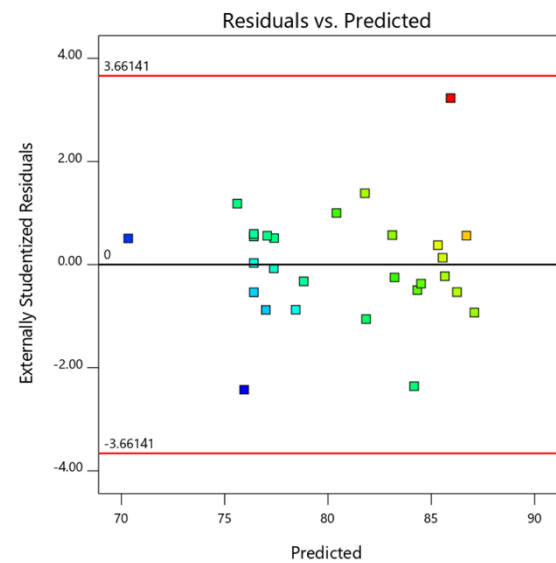
Gambar 6 Normal Plot Model Surface Roughness



Gambar 7 Normal Plot Model Cutting Temperature



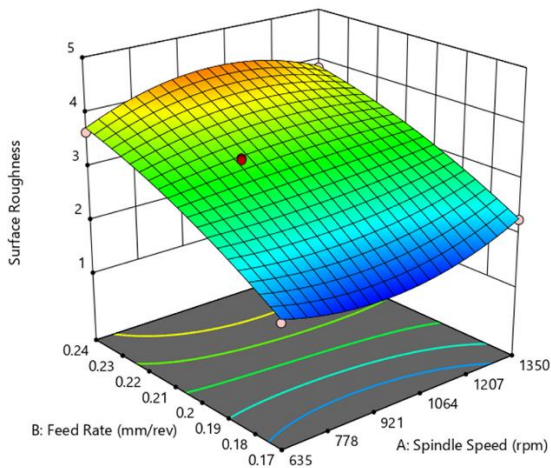
Gambar 8 Residual vs Predicted Model Surface Roughness



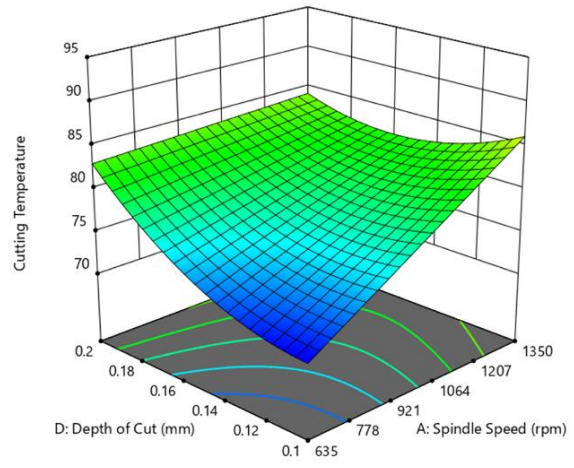
Gambar 9 Residual vs Predicted Model Cutting Temperature

Residual merupakan sisa atau selisih antara nilai prediksi dengan nilai normal. Gambar () dan () merupakan normal plot model surface roughness dan cutting temperature, sebaran titik-titik mendekati garis linear menunjukkan bahwa data residual berdistribusi normal. Sebaran poin-poin yang tidak menunjukkan bentuk tertentu pada gambar () dan () menunjukkan bahwa model layak untuk digunakan. Berdasarkan perbandingan antara nilai prediksi dengan

aktual, persentase error dihitung dengan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Nilai MAPE untuk masing-masing model prediksi surface roughness dan cutting temperature berturut-turut adalah 5,29% dan 2,35%. Akurasi model lebih dari 85% menunjukkan bahwa model layak untuk digunakan analisis lebih lanjut [6].



Gambar 10 3D Plot Model Surface Roughness



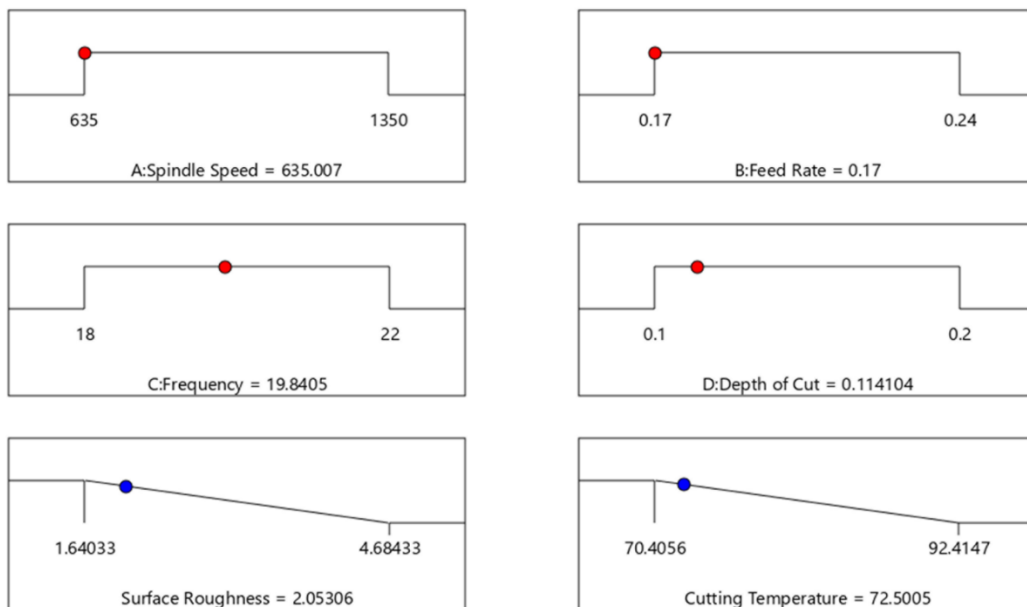
Gambar 11 3D Plot Model Cutting Temperature

Gambar () dan () merupakan 3D Plot masing-masing model surface roughness dan cutting temperature. Terlihat dengan jelas pengaruh feed rate terhadap surface roughness (Ra) sangat signifikan, sesuai dengan model prediksi Ra yang populer digunakan sebagai berikut.

$$Ra = \frac{0,032 \times f^2}{r}$$

Ra didefinisikan sebagai hasil dari perkalian koefisien (0,032) dengan angka feed rate (f) dikuadratkan dan dibagi dengan nose radius insert yang digunakan (r) [7]. Model prediksi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan feed rate secara signifikan mengakibatkan peningkatan nilai surface roughness. Sedangkan 3D plot model cutting temperature menunjukkan bahwa spindle speed dan depth of cut memberi pengaruh yang signifikan.

Berdasarkan model yang telah terpilih, poin optimal masing-masing faktor dapat ditentukan sehingga diperoleh hasil seperti ditunjukkan pada gambar.



Gambar 12 Variabel optimal

Kombinasi faktor-faktor pada titik optimal tersebut diprediksi akan menghasilkan kondisi permesinan dengan suhu pemotongan sebesar 72,5 °C dan permukaan dihasilkan dengan surface roughness (Ra) sebesar 2,053 µm.

4. Kesimpulan

Optimasi parameter Longitudinal Vibration Assisted Turning (VAT) dapat diselesaikan menggunakan metode RSM. Kombinasi parameter optimal untuk menghasilkan minimum surface roughness dan cutting temperature adalah pada spindle speed sebesar 635 rpm, feed rate 0,17 mm/rev, frekuensi 19,841 KHz, dan depth of cut 0,114 mm.

Parameter tersebut diprediksi mengakibatkan cutting temperature selama permesinan sebesar 72,5 °C dan menghasilkan surface roughness (Ra) sebesar 2,053 μm . Parameter optimal dihasilkan dari prediksi model surface roughness dan cutting temperature yang memadai secara statistik, dan menghasilkan prediksi akurat (tingkat akurasi lebih dari 85%). Tingkat akurasi model prediksi surface roughness dan cutting temperature berturut-turut sebesar 94,71% dan 97,65%.

Reference

- [1] Research and Markets, “Insights Into the World Precision Parts Market (2019-2024)_ Open Architectures & Rising Subscription-based CAD Software are Key Emerging Trends,” 2019. [Online]. Available: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/08/19/1903372/0/en/Insights-Into-the-World-Precision-Parts-Market-2019-2024-Open-Architectures-Rising-Subscription-based-CAD-Software-are-Key-Emerging-Trends.html>. [Accessed: 20-Sep-2019].
- [2] J. P. Davim and M. J. Jackson, *Nano and Micromachining*. Great Britain: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [3] K. Liu, H. Wang, and Z. Zhang, *Ductile Mode Cutting of Brittle Materials*. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [4] T. Moriwaki, E. Shamoto, and K. Inoue, “Ultraprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration,” vol. 41, no. 2, pp. 141–144, 1992.
- [5] M. N. Kumar, S. Kanmani Subbu, P. Vamsi Krishna, and A. Venugopal, “Vibration assisted conventional and advanced machining: A review,” *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1577–1586, 2014.
- [6] K. Vivekananda, A. Kumar, and S. K. Sahoo, “Prediction of UVAT response parameters by using linear regression analysis,” *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 4840–4846, 2019.
- [7] Boothroyd G. and W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.