PERANCANGAN KOMBINASI PARAMETER PERMESINAN CORNER-MILLING UNTUK MENDAPATKAN SURFACE ROUGHNESS OPTIMAL PADA THIN WALL COMPONENT DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI

DESIGN OF CORNER MILLING MACHINE PARAMETERS COMBINATION FOR OPTIMUM SURFACE ROUGHNESS ON THIN WALL COMPONENT USING THE TAGUCHI METHOD

Muhammad Sohibul Wafa[1], Rino Andias Anugraha[2], Agus Kusnayat[3]

[1,2,3] Universitas Telkom, Bandung
[1]**waffamuhammad@telkomuniversity.ac.id**, [2]**rinoandias@telkomuniveristy.co.id**,
[3]**guskus@telkomuniversity.ac.id**

Abstrak

Surface roughness (Ra) merupakan salah satu spesifikasi untuk menentukan kualitas dan kepresisian suatu komponen. Surface Roughness adalah parameter yang dapat menentukan tingkat kekasaran suatu permukaan. Thin wall component merupakan salah satu komponen permesinan sehingga memungkinkan memiliki permukaan yang kasar. Thin wall component cenderung memiliki kemungkinan memiliki permukaan yang kasar lebih besar. Hal tersebut dikarenakan hardness dari thin wall component yang lebih rendah. Hardness merupakan salah satu factor yang dapat meningkatkan kemungkinan permukaan yang dihasilkan lebih kasar. Secara umum, thin wall component terdiri dari beberapa pocket. Dalam pembuatan pocket, bagian sudut merupakan bagian yang kritikal. Pada bagian sudut, terjadinya peningkatan sudut kontak antara pahat potong dengan material. Peningkatan sudut kontak pahat potong dengan material tersebut dapat menyebabkan perubahan cutting force yang berakibat pada hasil permukaan yang kasar. Permukaan yang lebih kasar dapat menurunkan kekuatan suatu komponen. Dalam upaya meningkatkan kualitas permukaan pada bagian sudut thin wall component maka diperlukannya optimasi. Pada studi ini dilakukan optimasi parameter permesinan milling dengan menggunakan metode Taguchi dan uji ANOVA. Material yang digunakan pada studi ini adalah aluminium alloy 6061. Faktor yang digunakan meliputi feedrate (f), spindle speed (s), dan depth of cut(d). Pada penelitian ini ditentukan 3 level pada setiap faktor. Eksperimen dilakukan berdasarkan orthogonal array $L_9(3^3)$ ***yang didapat dari kombinasi level dan faktor. Pengukuran nilai Ra dilakukan dengan menggunakan stylus method. Pada penelitian ini didapatkan kombinasi parameter optimal pada feedrate 200 mm/min, spindle speed 1400 rpm, dan depth of cut 0,5mm. Hasil dari Uji ANOVA menjelaskan bahwa depth of cut merupakan faktor dengan persentase kontribusi terbesar dengan karakteristik semakin tipis kedalaman pemotongan akan menghasilkan kualitas permukaan yang semakin baik.***

Kata kunci: Surface Roughness, Metode Taguchi, *Thin-Wall Component*, Corner Milling

Abstract

Surface roughness (Ra) is one of the specifications to determine the quality and precision of a component. Surface Roughness is a parameter that can determine the level of roughness of a surface. Thin-wall component is one component that has possibility of surface roughness. Thin wall component is one of the machining components that allows it to have a rough surface. Thin wall components tend to have a greater chance of having a rough surface. This is due to the lower hardness of the thin wall components. Hardness is one of the factors that can increase the possibility of a rougher surface. In general, thin-wall components consist of several pockets. In making a pocket, the corner is a critical part. At the corner, there is an increase in the contact angle between the cutting tool and the material. The angle of contact of the cutting tool with the material can cause a change in the cutting force which results in an increase in rough results. A rougher surface can decrease the strength of a component. To improve the surface quality at the corners of the thin wall component, optimization is needed. In this study, milling machine parameters were optimized using the Taguchi method and ANOVA. The material used in this study is aluminum alloy 6061. The factors used include feedrate (f), spindle speed (s), and depth of cut (d). The experiment was carried out based on the orthogonal array $L_9(3^3)$ ***Measurement of the value of Ra is done using the stylus method. In this study, the optimal combination of parameters was obtained at a feedrate of 200 mm/min, a spindle speed of 1400 rpm, and a depth of cut of 0.5mm. The results of the ANOVA test explain that the depth of cut is the factor with the largest percentage contribution with smaller is better behavior.***

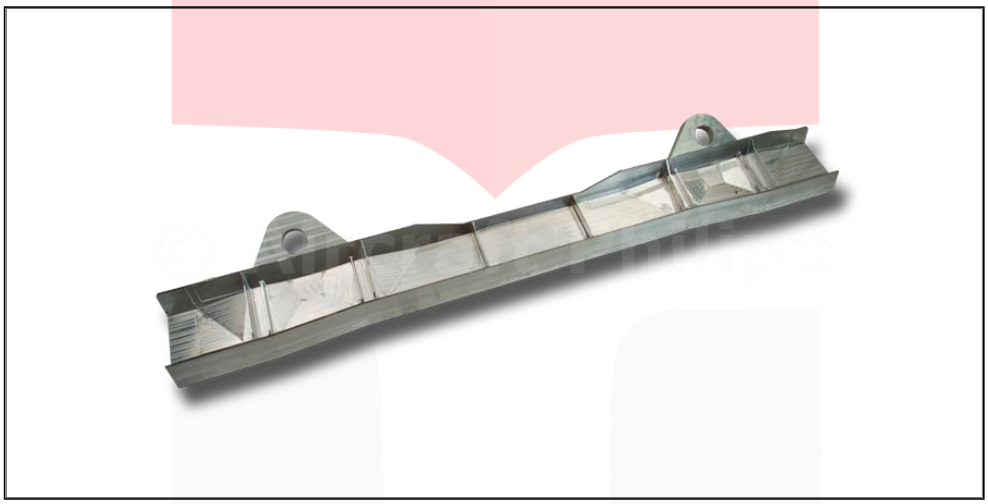
Keywords: Surface Roughness, Metode Taguchi, *Thin-Wall Component*, Corner Milling

1. Pendahuluan

Surface roughness menjadi salah satu indikator penting dalam menentukan kualitas suatu part. Dalam suatu studi yang dilakukan oleh Belenky & Rittel, [1] mengindikasikan bahwa *surface roughness* memiliki dampak yang buruk bagi kekuatan suatu part. Benda kerja yang memiliki nilai *surface roughness* lebih rendah memiliki strength lebih baik. Dampak lain dari *surface roughness* juga dapat mengurangi kepresisian suatu part.

Surface roughness dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Benardos & Vosniakos [2] mengindentifikasi terdapat 4 faktor yang dapat mempengaruhi *surface roughness* yaitu *cutting tools properties*, parameter permesinan, *workpiece properties* dan *cutting phenomena*. Dari empat faktor tersebut, parameter permesinan merupakan faktor yang dapat diganti dan disesuaikan dengan mudah. Parameter permesinan merupakan faktor yang meliputi *depth of cut*, *spindle speed*, dan *feedrate*. Surface roughness dapat terjadi pada hampir seluruh permukaan benda kerja, salah satunya adalah pada *thin wall component*.

Thin wall component merupakan suatu komponen struktural yang memiliki bagian tipis pada dindingnya seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. *Thin wall component* banyak digunakan karena memiliki beberapa keunggulan yaitu memiliki massa yang ringan, biaya yang lebih murah, komponen yang lebih akurat dan proses perakitan yang lebih mudah [3]. Dalam proses permesinan, pembuatan *thin wall component* juga dapat mengurangi lead time karena pembuatan *thin wall component* tidak terbagi menjadi beberapa bagian. Dalam pembuatan *thin wall component* material yang digunakan berupa bongkahan besar yang pada proses pembuatannya hampir 90-95% materialnya terbuang menjadi *waste*. Hal tersebut akan menyebabkan kerugian yang besar jika produknya mengalami defect.



Gambar 1 *Thin Wall Component*
(Dicetak kembali dari: https://www.aircraftphilipp.com/fileadmin/user_upload/produktionsbilder/machining-aluminium-wz/FRAESEN_ALU_008.png)

Dalam studi yang dilakukan oleh Bolar & Joshi [4] ditemukan *hardness* yang lebih rendah pada *thin wall component* dibandingkan dengan material awal. Workpiece hardness dapat mempengaruhi *surface roughness* yang dihasilkan [5]. Lebih randahnya hardness benda kerja akan meningkatkan kemungkinan terbentuknya *surface roughness* yang lebih tinggi pada permukaan *thin wall component*. Oleh sebab itu *thin wall component* memiliki kemungkinan lebih besar mengalami permukaan kasar dibandingkan komponen yang lebih tebal. Bentuk *thin wall component* umumnya berupa komponen yang membentuk pocket-pocket.

Salah satu bagian yang critical dalam bentuk pocket adalah bagian sudut atau *corner-milling*. Bagian sudut merupakan bagian yang paling rawan terbentuknya permukaan yang kasar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan cutting force pada pemakanan bagian sudut. *Cutting force* memiliki hubungan positif dengan nilai *surface roughness* yang dihasilkan [6]. Untuk meningkatkan kualitas permukaan pada bagian corner-milling dapat dilakukan penyesuaian terhadap cutting parameter yang meliputi *depth of cut*, *spindle speed* dan *feedrate*. Untuk mencapai tujuan itu, diterapkan metode taguchi dalam penelitian ini.

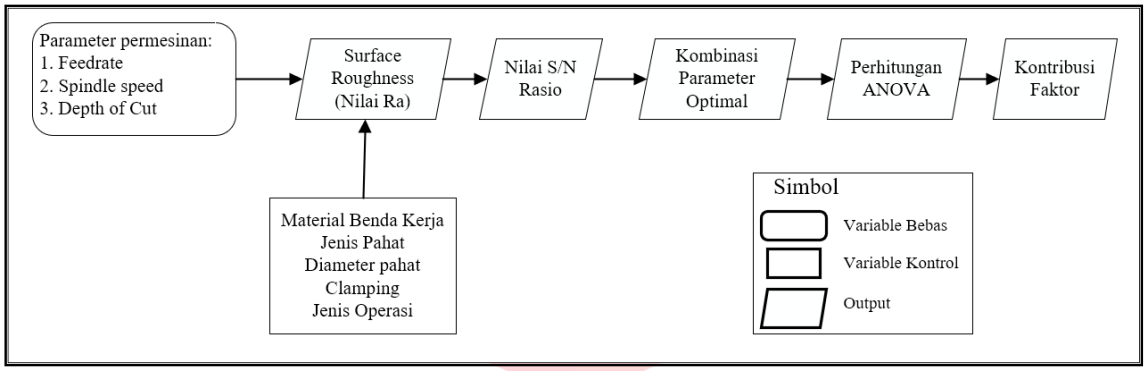
Metode Taguchi dapat menentukan kombinasi parameter permesinan optimal dari proses permesinan [7]. Keunggulan dari Metode Taguchi adalah dapat menentukan suatu kombinasi yang optimal dari beberapa faktor parameter, mengurangi waktu dan biaya pengembangan produk. Dalam studi yang dilakukan Moshat [8] diterapkan Metode Taguchi untuk menemukan kombinasi parameter permesinan yang tepat untuk menghasilkan kualitas permukaan pada benda kerja yang baik dan material removal rate (MRR) yang optimal. Studi yang dilakukan Kuram dkk [9] menggunakan Metode Taguchi dan uji ANOVA untuk menentukan parameter dan cutting fluid yang tepat untuk mengurangi cutting force pada proses permesinan dan tool wear pada pahat potongnya.

Berdasarkan hal tersebut, pada studi ini akan menganalisis parameter permesinan yang mempengaruhi *surface roughness* yang dihasilkan pada sudut *thin wall component* dengan menggunakan metode Taguchi dan uji ANOVA untuk mengetahui parameter yang memberikan kontribusi paling besar. parameter yang memiliki kontribusi paling besar akan dianalisis dan dilakukan eksperimen kembali untuk mengetahui perilakunya terhadap *surface roughness* yang dihasilkan.

2. Dasar Teori /Material dan Metodologi/perancangan

2.1 Prosedur Eksperimen

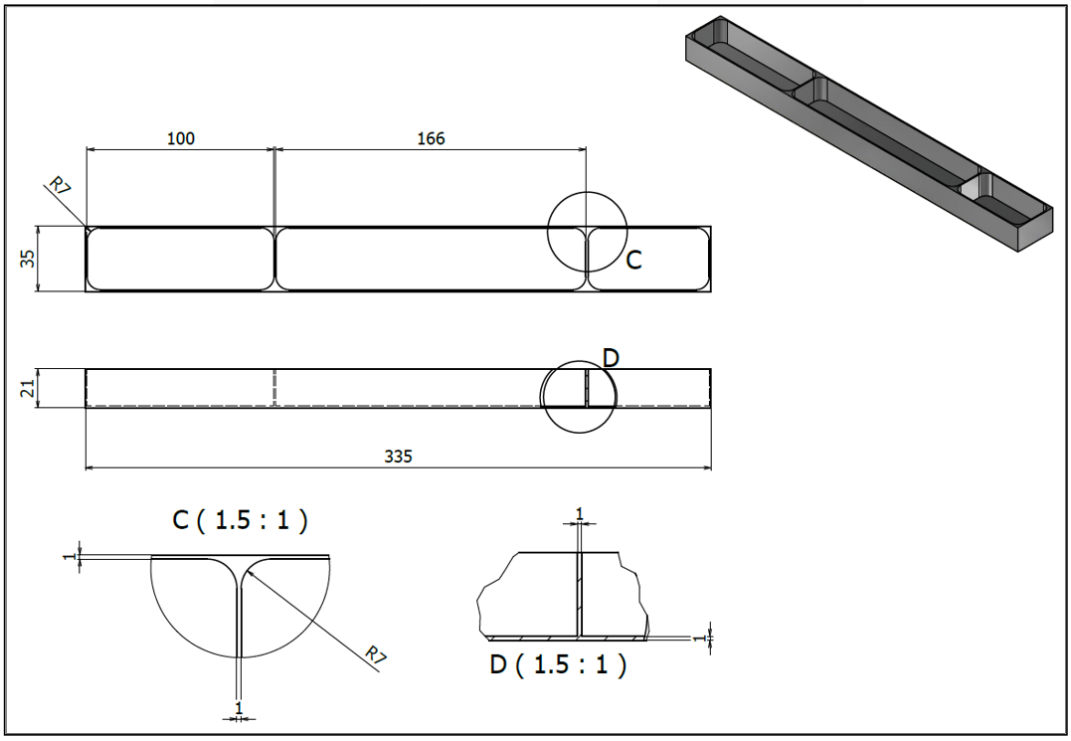
Gambar 2 menunjukkan prosedur eksperimen pada studi ini. Tahap awal pada studi ini adalah merancang parameter permesinan yang akan digunakan pada eksperimen dengan menggunakan metode Taguchi. Variabel bebas pada studi ini meliputi parameter permesinan yang terdiri dari *Feedrate*, *Spindle speed*, dan *Depth of cut*. sedangkan variable control pada studi ini meliputi material benda kerja, jenis pahat, system clamping dan proses operasi yang digunakan. Peralatan yang digunakan untuk proses eksperimen yaitu CNC Mill dan *Surface roughness tester*. Hasil dari eksperimen berupa nilai Ra dari bagian sudut yang diukur. Nilai Ra yang didapat digunakan untuk perhitungan *S/N Ratio*. Perhitungan *S/N Ratio* dilakukan untuk mengetahui kombinasi parameter yang optimal diantara seluruh percobaan yang dilakukan. Setelah itu, dilanjutkan dengan uji ANOVA untuk mengetahui kontribusi masing-masing parameter terhadap *surface roughness* yang dihasilkan.



Gambar 2 Prosedur Eksperimen

2.2 Material Benda Kerja

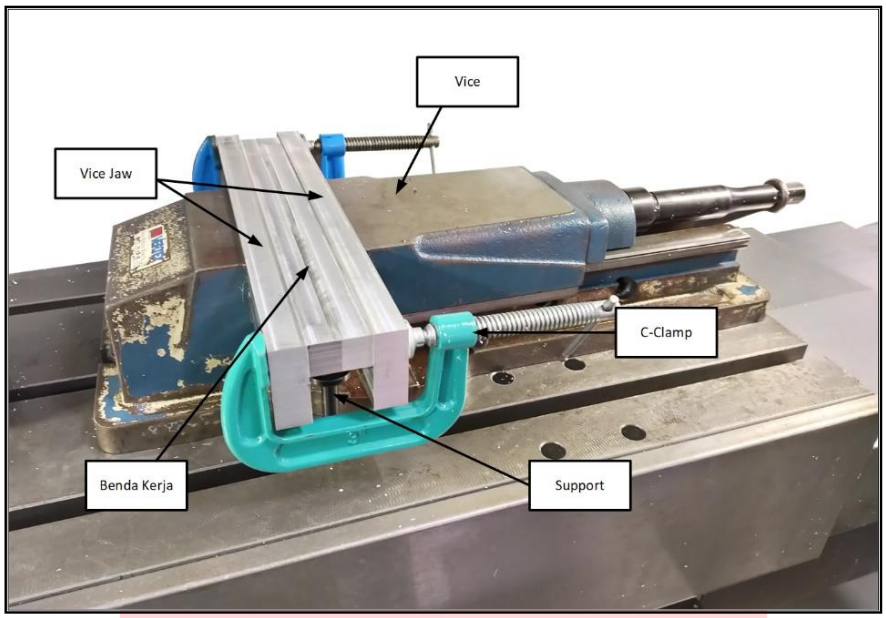
Pada studi ini, material yang digunakan adalah *aluminium alloy* 6061. *Aluminium alloy* merupakan material yang umum digunakan sebagai bahan pembuatan *thin wall component*. Bentuk dan dimensi dari benda kerja yang digunakan pada pembuatan *thin wall component* yang dibuat pada studi ini ditunjukkan oleh gambar 3.



Gambar 3 Dimensi Benda Kerja Thin Wall Component
(Satuan dimensi dalam mm)

2.3 Eksperimen Setup

Pada proses permesinan, alat yang digunakan adalah HAAS VF-2. Material benda kerja dijepit dengan menggunakan *vice* diatas meja kerja dengan posisi setup seperti pada gambar 4. Pahat potong yang digunakan adalah End Mill dengan diameter 12 mm dan memiliki empat *flutes*. Material pahat potong yang digunakan adalah HSS Cobalt.



Gambar 4 Setup Eksperimen

Terdapat tiga faktor yang digunakan pada studi ini yaitu *feedrate*, *spindle speed* dan *depth of cut*. Masing-masing faktor memiliki tiga level seperti yang ditunjukkan pada table 1. Dari jumlah faktor dan level dilakukan perancangan eksperimen dengan menggunakan metode Taguchi dan didapatkan notasi orthogonal array $L_9(3^3)$. Berdasarkan notasi tersebut, jumlah eksperimen yang dilakukan sebanyak 9 kali dengan kombinasi parameter permesinan seperti ditunjukkan pada table 2.

Tabel 1 Faktor dan Level

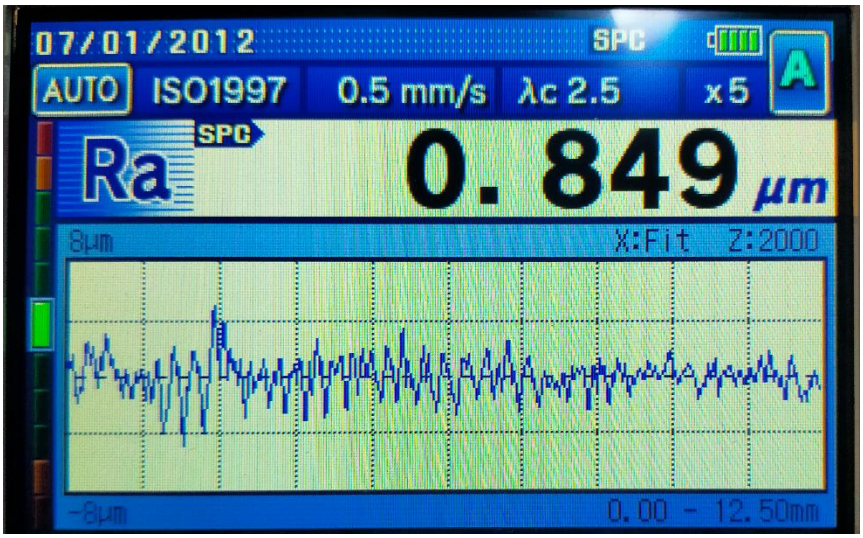
Faktor	Satuan	Level		
		1	2	3
Spindle speed	rpm	1400	1600	1800
Feedrate	mm/min	200	400	600
DoC	mm	0.5	1	1.5

Tabel 2 Orthogonal Array

Eksperimen ke-	*Spindle speed* (rpm)	*Feedrate* (mm/min)	*Depth of cut* (mm)
T1	1400	200	0.5
T2	1400	400	1.0
T3	1400	600	1.5
T4	1600	200	1.0
T5	1600	400	1.5
T6	1600	600	0.5
T7	1800	200	1.5
T8	1800	400	0.5
T9	1800	600	1.0

Benda kerja yang telah melewati proses permesinan diukur kekasaran permukaan sudutnya menggunakan *surface roughness* tester. Metode yang digunakan dalam pengukuran ini yaitu stylus. Metode stylus merupakan cara pengukuran dengan menggunakan jarum intan yang dirancang sedemikian rupa sehingga dapat menjangkau detil permukaan. Nilai yang diambil dari pengukuran ini adalah nilai Ra dengan panjang sample 15mm. Benda kerja dipasang diatas v-block agar benda kerja dapat miring 45°. agar ketinggian benda kerja dan jangkauan stylus sesuai, v-block diletakan diatas support yang memiliki dudukan yang sesuai dengan v-block.

Surface roughness tester akan membaca bentuk permukaan dalam skala mikron. Hasil dari pengukuran *surface roughness* berupa nilai Ra yang muncul pada display *surface roughness reader* seperti pada gambar 5. Setelah satu sisi diukur, dilakukan setup ulang untuk mengukur sisi sudut lainnya. Dalam 1 benda kerja pada setiap eksperimen, pengukuran dilakukan sebanyak 4 kali.



Gambar 5 Tampilan Hasil Pengukuran Nilai Ra

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Eksperimen

Untuk mengetahui kekasaran permukaan dari benda kerja yang telah melewati proses permesinan, dilakukan pengukuran menggunakan alat *surface roughness tester*. Setiap kombinasi menghasilkan rata rata nilai Ra yang berbeda seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Nilai Pengukuran Ra

Eksperimen ke	*Feedrate* (mm/min)	*Spindle speed* (rpm)	*Depth of cut* (mm)	Nilai Ra (μm)
T1	200	1400	0.5	0,414
T2	200	1600	1	0,668
T3	200	1800	1.5	0,507
T4	400	1400	1	0,538
T5	400	1600	1.5	0,600
T6	400	1800	0.5	0,554
T7	600	1400	1.5	0,570
T8	600	1600	0.5	0,543
T9	600	1800	1	0,606

Nilai Ra tertinggi didapatkan pada kombinasi eksperimen 2 dengan nilai 0,668µm dan nilai Ra paling rendah didapatkan pada kombinasi eksperimen 1 dengan nilai Ra 0,404µm. Pada eksperimen 1 merupakan nilai terbaik. Sedangkan pada eksperimen 2 merupakan eksperimen dengan nilai paling kurang.

3.2 Analisis *S/N Ratio*

S/N Ratio dilakukan untuk mengetahui kombinasi parameter yang menghasilkan respon paling signifikan. Terdapat tiga karakteristik dari *S/N Ratio* yaitu *smaller is better*, *normal is the best*, dan *larger is better*[10]. Pada studi ini, dipilih perhitungan *S/N Ratio* dengan karakter smaller is better dikarenakan hasil yang diharapkan adalah permukaan sehalus mungkin. Sehingga nilai Ra yang diharapkan sekecil mungkin. Nilai *S/N Ratio* ini dihitung dengan menggunakan persamaan 1.

$$\frac{S}{N_s} = -10^* \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \qquad (1)$$

Dimana n adalah jumlah data dari eksperimen, y adalah nilai dari masing-masing percobaan

Tabel 4 *S/N Ratio* Untuk Setiap Eksperimen

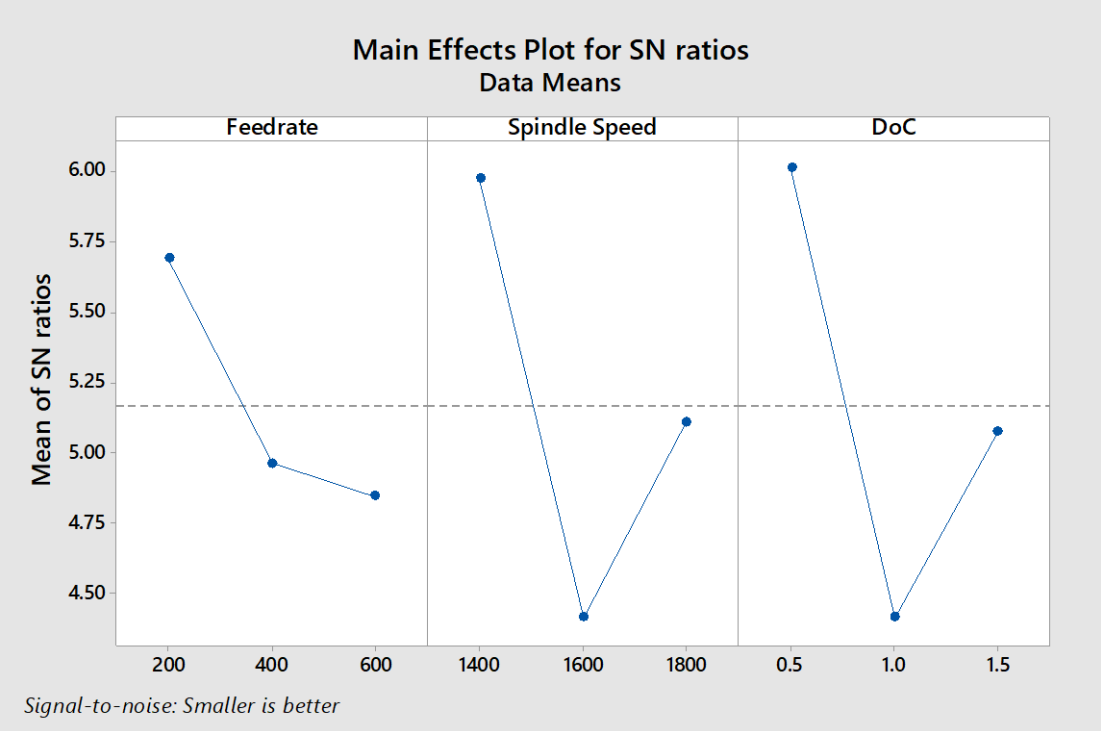
Eksperimen ke-	*S/N Ratio*
T1	7.660
T2	3.504
T3	5.904
T4	5.380
T5	4.433
T6	5.134
T7	4.879
T8	5.300
T9	4.351

Tabel 4 merupakan hasil perhitungan *S/N Ratio* dari masing-masing eksperimen. Dari table diatas dapat diketahui dari 9 kombinasi yang dilakukan, eksperimen 1 adalah eksperimen terbaik.

Tabel 5 *S/N Ratio* Untuk Setiap Level

	Feedrate	*Spindle speed*	*Depth of cut*
Level 1	5.690	5.973	6.031
Level 2	4.982	4.413	4.412
Level 3	4.843	5.129	5.072

Tabel diatas merupakan hasil perhitungan *S/N Ratio* dari masing-masing level. Nilai *S/N Ratio* tersebut didapat dari perhitungan dengan menggunakan software Minitab. Perhitungan *S/N Ratio* dari masing-masing level bertujuan untuk menemukan kombinasi parameter untuk menghasilkan *surface roughness* yang optimal.



Gambar 6 Main Effect Plot untuk *S/N Ratio*

Untuk mengetahui kombinasi parameter yang menghasilkan *surface roughness* optimal, ditentukan bernasarkan nilai *S/N Ratio* terbesar. Gambar 6 merupakan hasil perhitungan *S/N Ratio* per level yang diterjemahkan kedalam bentuk Main effect plot. Level optimal untuk masing-masing parameter ditandai oleh titik paling tinggi pada setiap faktor. berdasarkan gambar 6 dan table 5, dapat ditentukan kombinasi parameter yang menghasilkan *surface roughness* paling baik adalah parameter *feedrate*=200mm/min, *spindle speed* = 1400 rpm, *depth of cut* = 0.5 mm.

Pada parameter *feederate*, titik optimal berada pada level 1. Hal tersebut sesuai dengan penelitian Qiong dkk [11] dimana nilai dari Ra menurun ketika kecepatan potong diturunkan. Penurunan kecepatan makan dapat membuat pemakanan lebih stabil sehingga getaran yang terjadi saat proses pemakanan lebih kecil.
Parameter *spindle speed* menghasilkan titik optimal pada level 1 yaitu kecepatan putar 1400 rpm. Sesuai dengan penelitian Dweiri [12] dimana pada penggunaan endmill empat flute, didapatkan nilai Ra yang paling baik ada pada level paling rendah.

Parameter yang terakhir adalah *depth of cut*. Titik optimal untuk parameter ini ada pada level 1 dengan kedalaman pemakanan 0,5 mm. Pemakanan yang tipis membuat pemotongan lebih stabil dan menghasilkan getaran yang minim. Hal ini sesuai dengan penelitian Gologlu & Sakarya [13] Dimana nilai Ra didapat lebih baik pada kedalaman pemotongan yang lebih tipis dibanding dengan pemotongan yang dalam.

3.3 Analisis Uji ANOVA

Untuk mengetahui persentase kontribusi dan signifikansi dari masing-masing parameter dilakukan Uji ANOVA. Hasil dari perhitungan uji ANOVA disajikan dalam table berikut. Dari table berikut dapat diketahui kontribusi dari masing-masing parameter yaitu *Feedrate* sebesar 7,88%, Spindle speed sebesar 34.56%, dan *depth of cut* sebesar 37,69%. Dari hasil tersebut dapat ditentukan *depth of cut* memberikan kontribusi yang paling besar terhadap kekasaran permukaan pada bagian sudut *thin wall component*. Lalu di ikuti *spindle speed* dan *feedrate* di urutan selanjutnya. Urutan kontribusi tersebut juga didapatkan sesuai dengan penelitian optimasi deformasi pada *thin wall component*[14].

Tabel 6 Hasil Uji ANOVA

Parameter	DF	SS	F-Value	P-value	Kontribusi
Feedrate	2	0,003172	0,4	0,716	7,88%
Spindle Speeed	2	0,013920	1,74	0,365	34,56%
Depth of cut	2	0,015180	1,9	0,345	37,69%
Error	2	0,008341			
Total	8	0,040275			

Gambar 7 Grafil Pengukuran Ra untuk Eksperimen Depth of Cut

Dari hasil tersebut, *depth of cut* dipilih untuk diteliti lebih lanjut mengenai perilakunya terhadap *surface roughness* yang dihasilkan karena memiliki kontribusi paling besar. Perilaku *depth of cut* tersebut diteliti dengan pendekatan eksperimen. Hasil eksperimen disajikan dalam grafik pada Gambar 7. Dari grafik tersebut, dapat dilihat nilai Ra yang semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kedalaman pemakanan. Hal tersebut menunjukkan semakin dalam pemakanan, *surface roughness* yang ditimbulkan akan semakin kasar. sehingga dapat disimpulkan perilaku dari *depth of cut* adalah semakin tipis pemakanan akan menghasilkan kekasaran permukaan yang semakin baik.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini dilakukan perancangan kombinasi parameter permesinan (*feedrate*, *spindle speed*, *depth of cut*) untuk mengoptimasi *surface roughness* pada bagian sudut *thin wall component*. Berdasarkan pengolahan data dan analisis, adapun kesimpulan yang diperoleh penelitian ini sebagai berikut

- Kombinasi parameter permesinan yang dapat mengoptimasi nilai Ra pada permukaan bagian sudut *thin wall component* dihasilkan dengan kombinasi *feedrate* 200 mm/min (level 1), *spindle speed* 1400 rpm (level 1), dan *depth of cut* 0,5 mm (level 1). Kombinasi tersebut mengindikasikan semua parameter (*feedrate*, *spindle speed*, *depth of cut*) berada pada kombinasi level paling bawah untuk menghasilkan *surface roughness* yang optimal.
- Berdasarkan hasil uji ANOVA, didapatkan *depth of cut* merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap *surface roughness* yang dihasilkan pada bagian sudut *thin wall component*.
- Perilaku *depth of cut* terhadap *surface roughness* yang dihasilkan adalah semakin tipis proses pemakanan akan menghasilkan kualitas permukaan yang semakin baik.

Referensi

[1] A. Belenky and D. Rittel, "Static and dynamic flexural strength of 99.5% alumina: relation to *surface roughness*," *Mech. Mater.*, vol. 48, pp. 43–55, 2012.

[2] P. G. Benardos and G.-C. Vosniakos, "Predicting *surface roughness* in machining: a review," *Int. J. Mach. tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.

[3] M. Popma, "Computer aided process planning for high-speed milling of thin-walled parts," *Univ. Twente, Enschede, Netherlands*, 2010.

[4] G. Bolar and S. N. Joshi, "Experimental Study on Surface Integrity, Dimensional Accuracy, and Micro-Hardness in Thin-Wall Machining of Aluminum Alloy," *Int. J. Mater. Form. Mach. Process.*, vol. 5, no. 2, pp. 13–31, 2018.

[5] J. D. Thiele and S. N. Melkote, "Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 94, no. 2–3, pp. 216–226, 1999.

[6] G. Zheng, X. Cheng, L. Li, R. Xu, and Y. Tian, "Experimental investigation of cutting force, *surface roughness* and tool wear in high-speed dry milling of AISI 4340 steel," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 341–349, 2019.

[7] J. Z. Zhang and J. C. Chen, "Surface roughness optimization in a drilling operation using the Taguchi design method," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 24, no. 4, pp. 459–467, 2009.

[8] S. Moshat, S. Datta, A. Bandyopadhyay, and P. Pal, "Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 95–102, 2010.

[9] E. Kuram, B. T. Simsek, B. Ozcelik, E. Demirbas, and S. Askin, "Optimization of the cutting fluids and parameters using Taguchi and ANOVA in milling," in *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2010, vol. 2, pp. 1–5.

[10] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, and D. Figueiredo, "Optimization of cutting parameters to minimize the *surface roughness* in the end milling process using the Taguchi method," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 1, pp. 30–35, 2017.

[11] W. Qiong, Z. Yidu, and Z. Hongwei, "Corner-milling of Thin Walled Cavities on Aeronautical Components," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 22, no. 6, pp. 677–684, 2009, doi: https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60158-2.

[12] F. Dweiri, M. Al-Jarrah, and H. Al-Wedyan, "Fuzzy *surface roughness* modeling of CNC down milling of Alumic-79," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 133, no. 3, pp. 266–275, 2003.

[13] C. Gologlu and N. Sakarya, "The effects of cutter path strategies on *surface roughness* of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 206, no. 1–3, pp. 7–15, 2008.

[14] S. R. Putra and T. Sjafrizal, "Optimasi Parameter Pemesinan Milling Terhadap Deformasi Pada Thin Wall Component Dengan Menggunakan Metode Taguchi," *eProceedings Eng.*, vol. 7, no. 2, 2020.