

Pengaruh Derajat Kurva Polinomial terhadap Kualitas Kekasaran Permukaan dalam Proses Pemesinan Ball Milling.

1st Vincentius Andre Tedjalaksana
Faculty of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
andrecentlaksana@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Rino Andias Anugraha
Faculty of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
rinoandias@telkomuniversity.ac.id

3rd Teddy Sjafrizal
Faculty of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

Penggunaan kurva polinomial telah menjadi hal yang umum dalam industri, seperti pada pembuatan cetakan (mold), untuk merepresentasikan geometri yang kompleks. Penelitian ini menginvestigasi pengaruh kurva polinomial derajat dua, tiga, dan empat dengan interval koefisien utama $0 \leq a \leq 1$ terhadap kualitas kekasaran permukaan dalam proses pemesinan menggunakan ball mill pada material aluminium 6061. Eksperimen dilakukan secara empiris menggunakan mesin CNC milling dengan desain faktorial penuh sebanyak 54 replikasi, yang mencakup variasi derajat kurva (tiga level), kecepatan pemakanan (tiga level), dan kecepatan spindle (enam level). Kekasaran permukaan (R_a) diukur pada tiga area kurva—puncak, kanan atas, dan kanan bawah—masing-masing di empat titik. Hasil menunjukkan bahwa derajat kurva secara signifikan mempengaruhi kekasaran permukaan, di mana kurva derajat dua menghasilkan nilai R_a terendah, diikuti oleh kurva derajat empat, dan kurva derajat tiga menghasilkan nilai R_a tertinggi. Selain itu, nilai R_a cenderung meningkat dari area puncak menuju area kanan bawah kurva.

Kata kunci— Kurva polinomial, kekasaran permukaan, CNC Milling, feedrate, spindle speed.

I. PENDAHULUAN

Kurva polinomial, yang didefinisikan oleh persamaan matematis yang melibatkan pangkat dari variabel independen, memainkan peran penting dalam perancangan jalur pahat untuk proses pemesinan CNC, terutama dalam menghasilkan geometri kompleks yang semakin dibutuhkan oleh industri modern. Geometri semacam ini umumnya ditemukan pada komponen otomotif, cetakan (mold), dan komponen presisi tinggi lainnya, di mana akurasi dimensi dan kualitas permukaan sangat krusial.

Kurva polinomial derajat dua membentuk bentuk parabola yang sederhana, sedangkan kurva derajat tiga dan empat menghasilkan kontur yang semakin fleksibel dan kompleks dengan beberapa titik belok (infleksi). Penerapan kurva polinomial derajat dua, tiga, dan empat memungkinkan perancang untuk menciptakan profil permukaan yang lebih halus dan mudah disesuaikan.

Namun, penggunaan kurva dengan derajat yang lebih tinggi juga menimbulkan tantangan dalam proses pemesinan, seperti meningkatnya getaran alat, keausan alat, dan variasi kekasaran permukaan. Menurut [1], jalur pahat berbasis polinomial sangat memengaruhi kekasaran permukaan karena jenis interpolasi yang digunakan dalam pemodelan CAD—yakni G1 (linear), G2 (searah jarum jam), dan G3 (berlawanan arah jarum jam)—di mana G2 dan G3 biasanya

menggunakan gerakan spline. Gerakan spline menciptakan transisi antar titik yang lebih halus dibandingkan koneksi linier, yang dapat menghasilkan nilai R_a yang lebih rendah, dengan asumsi faktor-faktor lain tetap terkendali.

[2] Menekankan bahwa desain jalur pahat memengaruhi waktu pemesinan, gaya potong, kualitas permukaan, dan keausan alat. Meskipun kurva yang lebih halus umumnya meningkatkan hasil akhir permukaan, dalam beberapa kasus—terutama yang memerlukan toleransi geometrik yang ketat untuk keperluan perakitan—kekasaran permukaan harus dikendalikan secara presisi. Oleh karena itu, pemilihan kurva yang tepat tidak hanya memenuhi kebutuhan geometrik, tetapi juga memengaruhi efisiensi pemesinan, di mana waktu pemesinan yang lebih cepat berkontribusi terhadap optimalisasi sumber daya dan biaya secara keseluruhan.

II. KAJIAN TEORI

Dalam eksperimen ini untuk mengetahui pengaruh derajat kurva polinomial terhadap kualitas kekasaran permukaan dalam proses pemesinan ball milling, diperlukan beberapa informasi pendukung untuk menunjang langkah-langkah pemecahan masalah. Informasi tersebut mencakup kurva polinomial, proses pemesinan, kecepatan potong, dan kekasaran permukaan.

A. Kurva Polinomial

Fungsi polinomial, yang ditandai oleh keberadaan koefisien dan variabel, tidak hanya digunakan dalam perhitungan matematis, tetapi juga dalam aplikasi teknik secara praktis, termasuk dalam perancangan geometri 3D pada proses pemesinan seperti pembuatan cetakan (mold). Kurva polinomial dibentuk menggunakan fungsi:

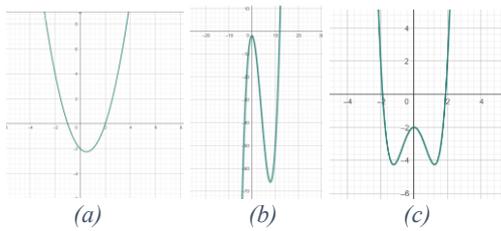
$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (1)$$

Dimana,

n : Integer non negative

a : Koefisien

Dengan memodifikasi fungsi (1), derajat polinomial yang lebih tinggi dapat dibentuk dengan mengganti nilai n . Dalam sistem CAD/CAM berbasis CNC, polinomial berderajat lebih tinggi (dua atau lebih) lebih disukai dibandingkan persamaan linear karena kemampuannya membentuk permukaan lengkung yang halus dan mudah dikendalikan.



Gambar 1

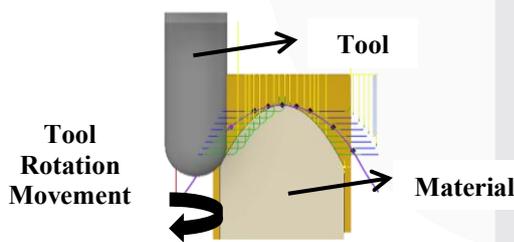
(a) contoh kurva polinomial derajat 2. (b) contoh kurva polinomial derajat 3. (c) contoh kurva polinomial derajat 4 (Geogebra.org)

Gambar 1 menggambarkan bentuk geometri dari tiga jenis kurva polinomial. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kurva dengan derajat yang lebih tinggi menawarkan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kontur yang kompleks, namun juga menimbulkan tantangan seperti meningkatnya getaran dan keausan alat. [3] menekankan bahwa jari-jari kelengkungan yang lebih tajam, yang sering dihasilkan dari polinomial berderajat tinggi, dapat menyebabkan peningkatan kekasaran permukaan (R_a).

B. Proses Pemesinan

Pemesinan adalah proses manufaktur subtraktif yang bertujuan untuk mencapai bentuk, dimensi, dan kualitas permukaan yang diinginkan melalui penghilangan material. Menurut [4], proses pemesinan melibatkan pembentukan serpihan (chip) dan dua gerakan utama—rotasi dan translasi—yang dikendalikan oleh parameter seperti kecepatan spindle, kecepatan pemakanan (feedrate), kedalaman pemotongan, kecepatan potong, dan geometri alat potong.

[5] menemukan bahwa variasi pada kecepatan spindle dan feedrate memiliki dampak yang lebih signifikan terhadap geometri non-linier seperti kurva, sementara pengaruhnya terhadap area datar relatif kecil. Selain itu, mereka menyimpulkan bahwa kecepatan spindle tidak secara langsung memengaruhi waktu pemesinan, yang merupakan faktor penting dalam perencanaan dan optimalisasi produksi.



Gambar 2

Ilustrasi Proses Pemesinan (modification © author)

Gambar 2 menggambarkan proses pemesinan yang dilakukan melalui interaksi antara alat potong dan material untuk membentuk suatu produk. Feedrate akan memengaruhi material, sedangkan kecepatan spindle dalam proses milling akan memengaruhi alat potong. Saat alat dan material berinteraksi, akan timbul gaya, di mana nilai gaya tersebut bergantung pada seberapa banyak material yang tidak diinginkan dihilangkan, serta seberapa banyak interpolasi yang dibentuk oleh geometri dan jalur pahat. Faktor-faktor ini akan memengaruhi hasil geometri produk dan kekasaran permukaan.

C. Cutting Speed

Kecepatan potong memengaruhi gaya pemotongan, pelepasan panas, dan pada akhirnya kualitas permukaan. Kecepatan potong yang lebih tinggi dapat mengurangi akumulasi panas melalui pelepasan serpihan (chip), yang menghasilkan permukaan akhir yang lebih halus [6]. Namun, faktor-faktor seperti feedrate, sudut pemotongan, jenis alat potong, dan sifat material turut memengaruhi kecepatan potong yang sesuai. Jika panas yang dihasilkan melebihi titik leleh material, benda kerja dapat mengalami deformasi atau pelunakan, sehingga mengganggu ketelitian dimensi.

D. Spindle Speed

Kecepatan spindle, yang diukur dalam RPM, membantu pelepasan panas selama proses pemotongan dan memengaruhi hasil akhir permukaan. Kecepatan spindle yang lebih tinggi dapat menstabilkan interaksi antara alat dan material, sehingga menghasilkan permukaan yang lebih halus [7]. [8] mengamati bahwa peningkatan kecepatan spindle dapat menurunkan kekasaran permukaan apabila feedrate dijaga tetap.

Namun, [9] mencatat bahwa kecepatan spindle yang terlalu tinggi dapat menyebabkan getaran pada mesin, yang dapat menurunkan kualitas permukaan. Oleh karena itu, kecepatan spindle harus disesuaikan dengan kemampuan mesin dalam meredam getaran, dan penggunaan variasi adaptif dapat bermanfaat untuk mengurangi getaran yang tidak diinginkan (chatter).

E. Feedrate

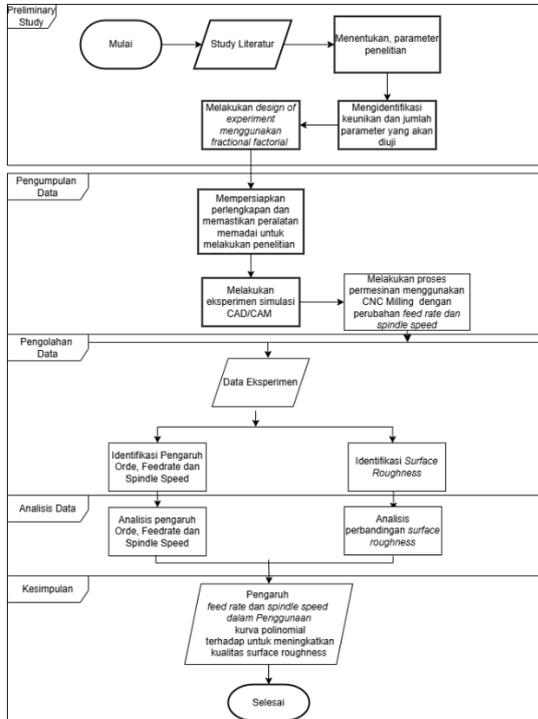
Feedrate menentukan kecepatan linier pergerakan alat terhadap benda kerja, yang biasanya diukur dalam satuan mm/menit. Feedrate sangat memengaruhi keausan alat, ketelitian produk, dan performa mesin [10]. Feedrate yang tinggi akan meningkatkan nilai R_a (kekasaran permukaan) dan dapat menyebabkan ketidaktepatan dimensi akibat tarikan material yang berlebihan. Dampak dari feedrate lebih terasa pada pemesinan geometri non-linier seperti kurva berderajat tinggi. Oleh karena itu, optimalisasi feedrate sangat penting untuk menyeimbangkan efisiensi pemesinan dan kualitas permukaan.

F. Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan (R_a) merupakan parameter penting dalam menjaga ketelitian dimensi dan kualitas estetika suatu produk. Kekasaran ini dipengaruhi oleh getaran alat, kedalaman pemotongan, feedrate, serta geometri alat potong, sehingga perlu dikendalikan untuk mencegah terjadinya cacat pada hasil akhir. [11] menemukan bahwa peningkatan feedrate dan kedalaman potong memperburuk getaran, yang pada akhirnya meningkatkan nilai R_a . [12] dalam penelitiannya menemukan bahwa kecuraman puncak lembah permukaan akan semakin meningkatkan nilai R_a yang dihasilkan dari proses pengukuran. Berdasarkan standar ISO 4287, pengukuran kekasaran permukaan harus dilakukan secara tegak lurus terhadap arah pemotongan untuk memastikan keakuratan nilai R_a , sehingga dibutuhkan geometri yang sesuai dengan instrumen pengukuran.

III. METODE

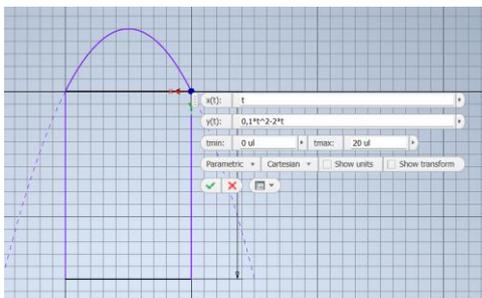
Proses pemecahan masalah untuk mengetahui pengaruh derajat polinomial akan menggunakan metode desain eksperimen (design of experiment), yang dimulai dengan studi pendahuluan, penentuan parameter, pemilihan material, pengaturan CAD/CAM dan mesin, proses pemesinan, pengumpulan data kekasaran permukaan, serta analisis, guna menghasilkan kesimpulan terkait permasalahan yang diteliti.



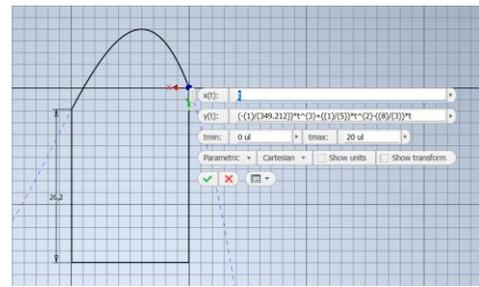
Gambar 3 Sistematika Penyelesaian Masalah

A. Menentukan Parameter Eksperimen

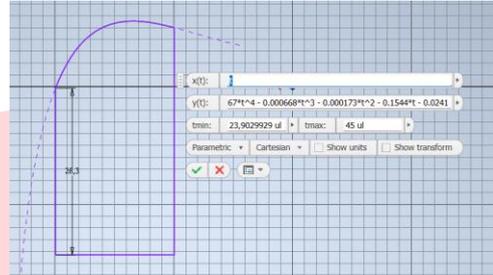
Pada tahap ini, parameter desain dan parameter pemesinan yang akan digunakan dalam eksperimen ditentukan. Dari sisi parameter desain, eksperimen akan menggunakan desain tiga level, yaitu kurva derajat 2, derajat 3, dan derajat 4. Kurva-kurva ini akan dibuat menggunakan fungsi polinomial dengan cakupan dimensi yang sama untuk semua desain, yaitu jarak 20 mm dari titik awal kurva ke titik lainnya. Proses desain CAD/CAM akan dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2025 pada komputer pribadi.



Gambar 4 Desain Kurva Derajat 2



Gambar 5 Desain Kurva Derajat 3



Gambar 6 Desain Kurva Derajat 4

Dari parameter pemesinan, eksperimen ini akan menggunakan feedrate dan kecepatan spindle, di mana feedrate akan menggunakan 3 level yaitu 300, 400, dan 500 mm/menit, sedangkan kecepatan spindle akan menggunakan 6 level yaitu 3000, 4000, 6000, 6500, 7500, dan 8000 RPM.

B. Merancang Design Of Experiment

Langkah ini bertujuan untuk menghasilkan replikasi dari tahapan eksperimen berdasarkan parameter-parameter yang telah ditentukan pada tahap sebelumnya. Proses pembuatan replikasi akan dilakukan menggunakan perangkat lunak Minitab 18 dengan memasukkan semua level parameter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Design Summary

Factors: 3 Replicates: 1
Base runs: 54 Total runs: 54

Figure 7

Replication Generation Process

Dari proses replikasi, didapatkan hasil pada Tabel 1.

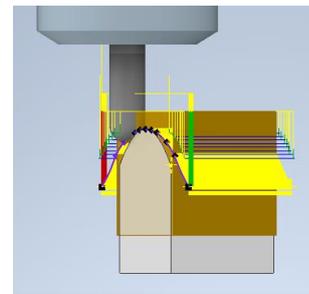
Tabel 1

Replication Generation Result

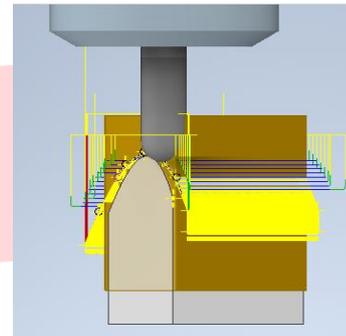
RunOrder	Curve Degree	Feedrate	Spindle Speed
1	3	400	8000
2	4	300	8000
3	3	300	6500
4	4	500	8000
5	4	500	7500
6	2	500	8000
7	3	500	8000
8	2	400	7500
9	4	400	8000
10	3	400	8000
11	4	500	8000
12	3	400	8000
13	2	300	8000
14	2	500	6500
15	3	300	7500

Table 2 Replication Generation Result (cont.)

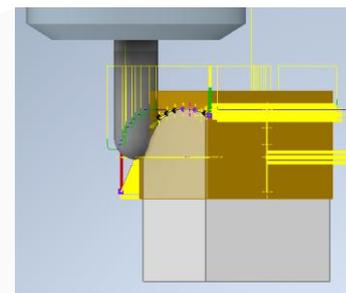
RunOrder	Curve Degree	Feedrate	Spindle Speed
16	4	300	8000
17	3	500	8000
18	2	400	8000
19	4	400	8000
20	4	500	6500
21	4	400	6500
22	2	300	6500
23	2	400	6500
24	3	300	6500
25	2	300	8000
26	2	300	8000
27	4	500	8000
28	4	400	7500
29	2	500	8000
30	3	500	6500
31	4	500	8000
32	3	300	8000
33	2	500	6500
34	2	400	6500
35	2	300	6500
36	2	500	8000
37	2	500	7500
38	3	500	8000
39	4	300	8000
40	3	400	6500
41	2	300	7500
42	4	300	8000
43	3	300	8000
44	2	400	8000
45	4	400	8000
46	4	400	8000
47	3	500	7500
48	4	300	6500
49	3	300	8000
50	3	400	7500
51	2	400	8000
52	3	400	8000
53	3	500	8000
54	4	300	7500



Gambar 8
CAD/CAM Untuk Kurva Derajat 2



Gambar 9
CAD/CAM Untuk Kurva Derajat 3



Gambar 10
CAD/CAM Untuk Kurva Derajat 4

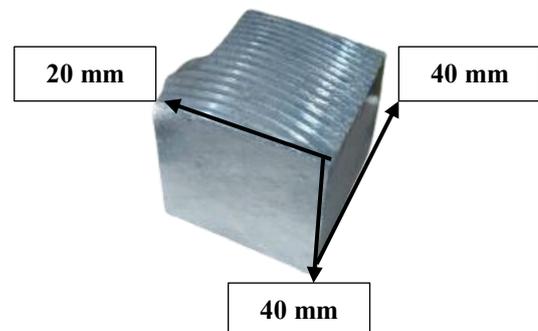
C. Merancang CAD/CAM Sesuai Hasil Replikasi

Langkah ini bertujuan untuk membuat file CAD/CAM dengan menggunakan setiap kombinasi feedrate dan kecepatan spindle sesuai hasil replikasi. Setiap derajat kurva dibuat sebanyak 18 file yang berbeda, sehingga total file CAD/CAM yang harus disiapkan adalah 54 file. Dari file CAD/CAM ini, waktu pemesinan untuk setiap objek dapat dihitung guna memperkirakan berapa lama eksperimen akan berlangsung hingga selesai. Untuk hasil visual permukaan yang lebih baik, proses CAM menggunakan program pelacakan (tracing) dengan jarak antar bidang sebesar 0,05 mm. Pengaturan ini ditunjukkan pada Gambar 8 untuk kurva derajat dua, Gambar 9 untuk kurva derajat tiga, dan Gambar 10 untuk kurva derajat empat.

Material mentah yang dibutuhkan dalam eksperimen ini untuk setiap objek memiliki dimensi sekitar 40 × 20 × 40 mm, dan alat yang digunakan adalah endmill rata berdiameter 12 mm serta ball mill berdiameter 10 mm. Semua kebutuhan pemesinan ini juga perlu diatur dalam proses CAM.

D. Mempersiapkan Material

Setelah program CAD/CAM siap, material yang akan digunakan harus dipersiapkan. Aluminium 6061 dengan dimensi 40 × 20 × 40 mm disiapkan sebanyak kurang lebih 60 buah. Material tersebut juga harus diperiksa kondisi permukaannya, di mana semua sisi harus rata dan memiliki kesamaan pada seluruh 60 buah material.

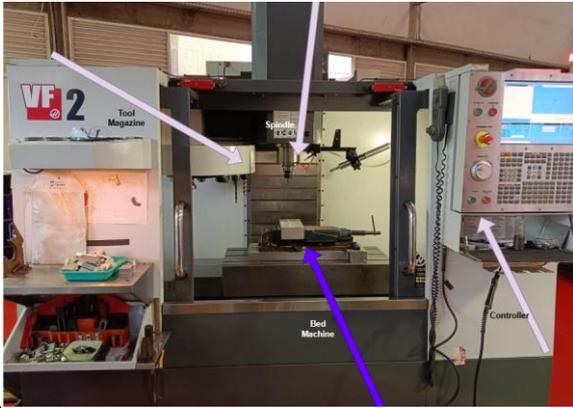


Gambar 11
Material

E. Setup Tools, Workholding, dan Mesin

Pada tahap ini, dilakukan penyetelan (setup) terhadap komponen-komponen seperti alat potong flat endmill 12 mm dan ball mill 10 mm yang dipasang pada tool magazine, serta workholding seperti fixture dan ragum (vice) yang dipasang pada meja mesin. Pengaturan posisi dari setup ini dapat dilihat pada Gambar 12.

Setelah semua komponen di atas selesai disiapkan, selanjutnya dilakukan penyetelan material terhadap sumbu X dan Y sebagai datum, dan alat potong disetel untuk sumbu Z.



Gambar 12 CNC Milling Machine Setup and Components

F. Melakukan Proses Permesinan

Setelah mesin dan material siap, program CAD/CAM dapat dipindahkan ke flashdisk dan dimasukkan ke dalam kontroler mesin. Jalankan terlebih dahulu Program Tryout (PTO) untuk memastikan keamanan program sebelum dijalankan pada material sebenarnya. Setelah PTO berhasil dijalankan, proses pemesinan dimulai untuk seluruh objek.



Gambar 13 Machining Process

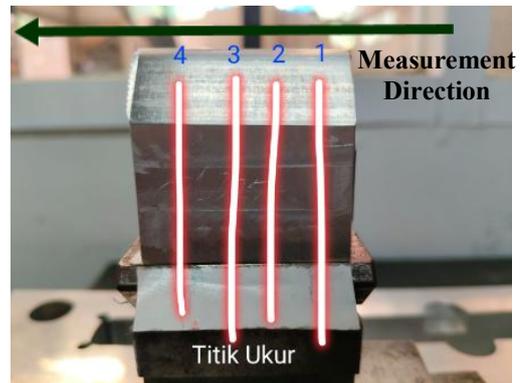
G. Melakukan Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pada tahap ini, hasil dari proses pemesinan diukur menggunakan mesin pengujian kekasaran permukaan. Proses pengukuran dilakukan pada 3 sisi dari setiap objek, dan pada setiap sisi dilakukan pengukuran di 4 titik.



Gambar 14

(a). sisi ukur kurva derajat 2 dan 3 (b). sisi ukur kurva derajat 4



Gambar 15 Measurement Points

Gambar 14 (a) menunjukkan bahwa terdapat 3 sisi kurva yang dapat digunakan untuk proses pengukuran pada objek kurva derajat 2 dan 3, sedangkan pada Gambar 14 (b) hanya terdapat dua sisi yang ditunjukkan dengan angka 1 dan 2 yang dapat digunakan untuk pengukuran. Karena perbedaan kondisi tersebut, pengukuran hanya akan dilakukan pada dua sisi kurva yang direpresentasikan oleh angka 1 dan 2. Angka 1 akan dinamakan "sisi puncak" dan angka 2 akan dinamakan "sisi kanan". Pada sisi kanan, proses pengukuran akan dibagi lagi menjadi "sisi kanan atas" dan "sisi kanan bawah", sehingga total ada 3 sisi yang akan diukur. Gambar 15 menunjukkan titik-titik pengukuran pada masing-masing sisi. Terdapat 4 titik pengukuran dengan arah pengukuran dari kiri ke kanan.

H. Membuat Visualisasi, dan Melakukan Tes ANOVA

Pada tahap ini, hasil pengukuran kekasaran permukaan diproses ke dalam bentuk grafik yang dapat menggambarkan pola dan tren data dari hasil pengukuran. Uji ANOVA juga dilakukan terhadap data untuk mengetahui sejauh mana masing-masing parameter memengaruhi nilai Ra, apakah parameter tersebut berpengaruh signifikan terhadap Ra atau tidak, serta berapa persen tingkat signifikansi pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis ANOVA

Hasil pengukuran diproses untuk uji ANOVA guna melihat tingkat signifikansi dari setiap parameter eksperimen terhadap nilai Ra. Tingkat signifikansi yang digunakan dalam eksperimen ini adalah 0,05. Selain itu, kontribusi dari setiap parameter juga dihitung menggunakan rumus:

$$\frac{Adj SS}{Total Adj SS} \times 100\% \quad (2)$$

Table 3 ANOVA Result Sisi Puncak

Source	Contribution	P-Value
Curve Degree	3,51%	0,166
Feedrate	5,67%	0,213

Spindle Speed	12,71%	0,230
Other Factor	77,81%	

Tabel 15 menunjukkan bahwa dari ketiga parameter yang diuji, tidak ada satupun yang memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai Ra pada sisi puncak. Namun, nilai *p-value* dari derajat kurva lebih signifikan dibandingkan feedrate dan kecepatan spindle. Hal ini menunjukkan bahwa derajat kurva memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap nilai Ra secara keseluruhan dibandingkan feedrate dan kecepatan spindle.

Berdasarkan kontribusinya, kecepatan spindle memberikan kontribusi yang besar selama proses pemesinan, dan kontribusi tersebut berasal dari interaksi antara alat potong dan material. Kontak ini menghasilkan faktor lain seperti getaran, yang memberikan pengaruh lebih besar terhadap nilai Ra. Oleh karena itu, kontribusi dari faktor lain lebih besar dibandingkan faktor utama, dan hal ini menyebabkan parameter utama tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan.

Table 4 ANOVA Result Untuk Sisi Kanan Bawah

Source	Contribution	P-Value
Curve Degree	10,58%	0,010
Feedrate	0,26%	0,913
Spindle Speed	21,65%	0,022
Other Factors	62,20%	

Tabel 16 menunjukkan bahwa dari ketiga parameter, derajat kurva memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai Ra pada sisi kanan atas. Dapat disimpulkan bahwa derajat kurva memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap kekasaran permukaan dibandingkan kecepatan spindle dan feedrate. Berdasarkan kontribusinya, kecepatan spindle memberikan kontribusi terbesar selama proses pemesinan, diikuti oleh derajat kurva pada sisi kanan atas yang juga memengaruhi proses pemesinan. Kontribusi ini juga berasal dari interaksi antara alat potong dan material, di mana kontak tersebut menghasilkan faktor lain seperti getaran yang memberikan pengaruh lebih besar terhadap nilai Ra. Itulah sebabnya kontribusi dari faktor lain lebih besar dibandingkan kecepatan spindle dan feedrate. Namun, karena derajat kurva memberikan pengaruh yang signifikan, hal ini mampu mengurangi dampak dari faktor-faktor lainnya.

Table 5 ANOVA Result Untuk Sisi Kanan Atas

Source	Contribution	P-Value
Curve Degree	11,51%	0,013
Feedrate	0,50%	0,865
Spindle Speed	4,24%	0,777
Other Factors	75,18%	

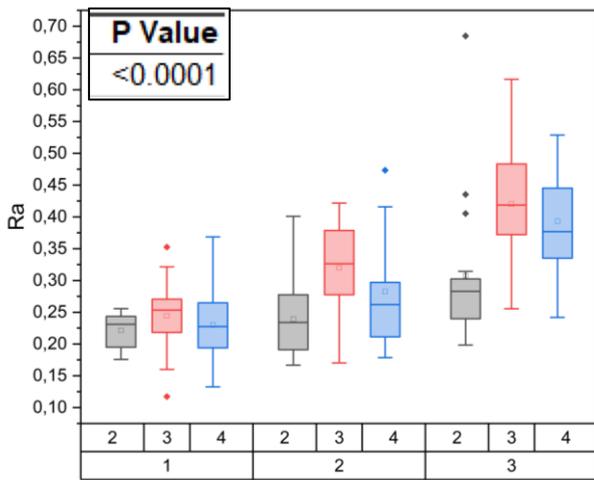
Tabel 17 menunjukkan bahwa dari ketiga parameter, derajat kurva memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai Ra pada sisi kanan bawah. Dapat disimpulkan bahwa derajat kurva memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan dibandingkan kecepatan spindle dan feedrate. Berdasarkan kontribusi, terjadi perbedaan pada sisi kanan bawah, di mana derajat kurva memberikan kontribusi yang lebih besar daripada kecepatan spindle selama proses pemesinan.

Kondisi ini dapat terjadi karena sisi kanan bawah berada dekat dengan titik interpolasi antara sisi linear dan sisi lengkung, yang menyebabkan transformasi derajat kurva lebih memengaruhi proses pemesinan dan menghasilkan gaya eksternal yang lebih besar dibandingkan sisi lainnya. Hal ini menyebabkan kontribusi dari faktor lain kembali meningkat jika dibandingkan dengan sisi kanan atas.

Kontribusi ini juga berasal dari interaksi antara alat potong dan material, di mana kontak tersebut menghasilkan faktor lain seperti getaran yang memberikan pengaruh lebih besar terhadap nilai Ra. Oleh karena itu, kontribusi dari faktor lain lebih besar dibandingkan kecepatan spindle dan feedrate, tetapi karena derajat kurva memberikan pengaruh yang signifikan, hal ini mampu mengurangi pengaruh dari faktor-faktor lainnya.

B. Pengaruh Perubahan Derajat Kurva vs Ra

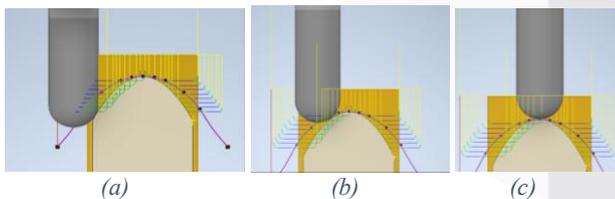
Seluruh data pengukuran kekasaran permukaan kemudian divisualisasikan menggunakan diagram boxplot untuk melihat tren yang disebabkan oleh perubahan derajat kurva terhadap nilai Ra.



Gambar 16 Perubahan Derajat Kurva vs Ra Data Trend

Nilai kekasaran permukaan (Ra) cenderung meningkat, disertai dengan variasi data yang semakin lebar, seiring dengan bertambahnya jarak area pengukuran dari puncak kurva. Sebagai contoh, pada kurva derajat dua, nilai maksimum Ra di sisi puncak adalah 0,24 mikron, yang meningkat menjadi 0,3 di sisi kanan atas dan selanjutnya menjadi 0,35 mikron di sisi kanan bawah. Penyebaran data juga semakin melebar secara bertahap; pada sisi puncak kurva derajat dua, variasinya mencapai hingga 0,25. Di sisi kanan atas, intervalnya meluas hingga 0,4. Menariknya, sisi kanan bawah menunjukkan variasi yang lebih besar lagi, termasuk dua nilai Ra yang mendekati 0,45 dan satu outlier ekstrem yang mencapai 0,65 mikron.

Tren serupa juga diamati pada kurva derajat tiga dan empat, di mana baik nilai Ra maupun tingkat variabilitasnya cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya jarak dari puncak kurva. Pada posisi puncak, peningkatan derajat kurva berkorelasi dengan variasi data yang lebih besar. Namun, di sisi kanan atas terjadi anomali, yaitu kurva derajat tiga menunjukkan variabilitas tertinggi—terlihat adanya peningkatan dari derajat dua, namun terjadi penurunan dari derajat tiga ke derajat empat.



Gambar 17

(a). sudut kontak ballmill di sisi kanan bawah, (b) sudut kontak ballmill di sisi kanan atas, (c) sudut kontak ballmill di puncak kurva

Penyimpangan ini kemungkinan disebabkan oleh kondisi kontak antara alat dan material yang tidak ideal. [13] melaporkan bahwa kekasaran permukaan, khususnya nilai Ra, cenderung meningkat secara signifikan ketika titik kontak antara alat dan material bergeser, sehingga menghasilkan gaya potong lateral yang memicu getaran. Pengaruh eksternal semacam ini dapat mengaburkan pengaruh langsung dari derajat kurva, dan menyebabkan variasi Ra yang lebih besar. Lebih lanjut, [3] menjelaskan bahwa jari-jari kurva yang lebih tajam menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih tinggi

karena keterlibatan alat potong yang lebih agresif. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 16, ketika kelengkungan menjadi lebih tajam, sisi samping dari alat potong semakin banyak berinteraksi dengan permukaan, sehingga memperkuat dinamika pemotongan dan pembentukan kekasaran permukaan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen dan perbandingannya dengan literatur teoritis, dapat disimpulkan bahwa pemilihan derajat kurva memainkan peran penting dalam menentukan kekasaran permukaan (Ra) saat merancang produk atau komponen yang melibatkan geometri lengkung. Derajat kurva harus dipilih dengan cermat untuk mencapai nilai Ra yang diinginkan dan, pada akhirnya, meningkatkan kualitas permukaan.

Di antara tiga derajat kurva yang diuji—dua, tiga, dan empat—jika tujuan utamanya adalah mendapatkan hasil akhir permukaan yang lebih halus, maka kurva derajat dua atau empat lebih disarankan. Sebaliknya, jika yang diinginkan adalah meningkatkan kekasaran permukaan, maka kurva derajat tiga dapat menjadi alternatif yang layak.

REFERENSI

- [1] D. Kučera, I. Linkeová, and M. Stejskal, "The influence of CAD model continuity on accuracy and productivity of CNC machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, no. 3–4, pp. 1115–1128, Jan. 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10422-w.
- [2] M. Uzun, Ü. A. Usca, M. Kuntoğlu, and M. K. Gupta, "Influence of tool path strategies on machining time, tool wear, and surface roughness during milling of AISI X210Cr12 steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 3–4, pp. 2709–2720, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00170-021-08365-9.
- [3] M. Gdula, "Empirical models for surface roughness and topography in 5-axis milling based on analysis of lead angle and curvature radius of sculptured surfaces," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 7, pp. 1–20, Jul. 2020, doi: 10.3390/met10070932.
- [4] M. P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing," vol. sixth edition, 2016.
- [5] Y. Akiyama, M. Iwaki, Y. Komagamine, S. Minakuchi, and M. Kanazawa, "Effect of Spindle Speed and Feed Rate on Surface Roughness and Milling Duration in the Fabrication of Milled Complete Dentures: An In Vitro Study," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 24, Dec. 2023, doi: 10.3390/app132413338.
- [6] G. J. Olling, B. K. Choi, and R. B. Jerard, "Erratum to: Machining Impossible Shapes," 2017, pp. E1–E1. doi: 10.1007/978-0-387-35392-0_40.
- [7] Marzariandi and Razali, "PENGARUH KECEPATAN SPINDLE DAN KEDALAMAN PEMOTONGAN MESIN FRAIS TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN BAJA ST 37 MENGGUNAKAN ENDMILL HIGH SPEED STEEL," 2024.

- [8] B. S. Widodo, A. R. Krisnanda, and K. A. Widi, "Pemakanan terhadap Kekasaran Permukaan dan Kekerasan Baja AISI 1020 pada Mesin Bubut CNC," vol. 14, no. 2, pp. 74–81, 2023.
- [9] P. Petráček, J. Falta, M. Stejskal, A. Šimůnek, P. Kupka, and M. Sulitka, "Chatter-free milling strategy of a slender Blisk blade via stock distribution optimization and continuous spindle speed change," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, no. 3–4, pp. 1273–1295, Jan. 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10264-6.
- [10] T. M. Duc and D. T. Anh, "International Journal of INTELLIGENT SYSTEMS AND APPLICATIONS IN ENGINEERING Dynamic Feed Rate Optimization for NURBS Interpolation of Alpha Profiles: Simulation Algorithm and Methodology," Mar. 2024. [Online]. Available: www.ijisae.org
- [11] Y. C. Lin, K. Da Wu, W. C. Shih, P. K. Hsu, and J. P. Hung, "Prediction of surface roughness based on cutting parameters and machining vibration in end milling using regression method and artificial neural network," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 11, Jun. 2020, doi: 10.3390/app10113941.
- [12] L. N. Hakim, R. A. Anugraha, T. Sjafrizal, Nopendri, P. P. Suryadhina, and M. R. Ibrahim, "Effect Of Ultrasonically Vibrated Cutting Tool on Surface Roughness of Micro Turning," *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 35–43, Jun. 2024, doi: 10.37934/armne.20.1.3543.
- [13] N. Villarrazo, Á. Sáinz de la Maza, S. Caneda, L. Bai, O. Pereira, and L. N. López de Lacalle, "Effect of tool orientation on surface roughness and dimensional accuracy in ball end milling of thin-walled blades," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jan. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14523-6.