



Analisis Pengaruh Variasi Kecepatan Spindel Terhadap Kekasaran Permukaan Material Scr420h Hasil Pemessinan CNC Turning Mazak Quick Turn Smart 250

Syahrizal Rafli Ferdian^{1*}, Jenni Ria Rajagukguk¹

¹Universitas Krisnadwipayana, Indonesia

*Corresponding author's e-mail: syarizalrafli@gmail.com

Article History:

Received: July 1, 2026

Revised: July 17, 2026

Accepted: July 30, 2026

Keywords:

spindle speed, surface roughness, CNC turning, SCr420H, finishing machining.

Abstract: Surface quality is an important parameter in machining processes because it affects component performance, dimensional accuracy, and service life. In CNC turning processes, spindle speed is one of the cutting parameters that significantly influences the surface characteristics of machined components. SCr420H steel is widely used in automotive components requiring high wear resistance and dimensional precision; however, the effect of spindle speed variation on its surface roughness using a Mazak Quick Turn Smart 250 CNC turning machine requires further experimental investigation. This study aims to analyze the effect of spindle speed variations on the surface roughness of SCr420H material and determine the optimum spindle speed based on the lowest roughness value. A quantitative experimental method with a one-factor design was conducted by varying spindle speeds of 1200, 1400, 1600, 1800, and 2000 rpm during the finishing CNC turning process. Other machining parameters were maintained constant, including a feed rate of 0.20 mm/rev, depth of cut of 0.4 mm, VNMG 160404-HQ insert with a 0.4 mm nose radius, and dry machining conditions. Surface roughness measurements were performed using a Surfcom 1800G Surface Roughness Tester to obtain Ra and Rz values. The results showed that spindle speed variations produced a non-linear change in surface roughness. The average Ra values at spindle speeds of 1200–2000 rpm were 3.679 μm , 5.258 μm , 5.942 μm , 5.512 μm , and 3.411 μm , respectively, while the average Rz values were 24.015 μm , 33.640 μm , 36.811 μm , 34.812 μm , and 22.071 μm , respectively. The optimum machining condition was achieved at a spindle speed of 2000 rpm, which resulted in the lowest Ra and Rz values. These findings indicate that proper spindle speed selection can improve the surface quality of SCr420H during CNC turning and provide a reference for determining machining parameters in precision manufacturing processes.

Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Ferdian, S. R., & Rajagukguk, J. R. (2026). Analisis Pengaruh Variasi Kecepatan Spindel Terhadap Kekasaran Permukaan Material Scr420h Hasil Pemessinan CNC Turning Mazak Quick Turn Smart 250. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 5(7), 3528–3545. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i7.6974>

PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur modern saat ini semakin diarahkan pada peningkatan kualitas produk, efisiensi proses produksi, dan kemampuan menghasilkan komponen dengan tingkat presisi tinggi. Industri otomotif, aerospace, dan manufaktur komponen mekanik membutuhkan proses pemessinan yang mampu menghasilkan dimensi geometris sesuai standar sekaligus memiliki kualitas permukaan yang baik. Salah satu indikator utama keberhasilan proses pemessinan adalah karakteristik kekasaran permukaan (surface roughness), karena parameter tersebut berhubungan langsung dengan performa komponen seperti ketahanan aus, kekuatan lelah, kemampuan kontak antarpemukaan,

serta umur pakai komponen. Permukaan dengan tingkat kekasaran yang tinggi dapat meningkatkan konsentrasi tegangan, mempercepat proses keausan, dan menurunkan keandalan komponen selama operasi. Oleh karena itu, pengendalian parameter pemesinan menjadi aspek penting dalam mencapai kualitas produk manufaktur yang optimal.

Proses Computer Numerical Control (CNC) turning merupakan salah satu teknologi pemesinan yang banyak digunakan dalam industri karena mampu menghasilkan komponen dengan tingkat akurasi dan konsistensi yang tinggi. Dalam proses CNC turning, kualitas hasil pemotongan dipengaruhi oleh berbagai parameter pemesinan seperti kecepatan spindel, laju pemakanan, kedalaman pemotongan, jenis pahat, material benda kerja, serta kondisi pendinginan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa interaksi antarparameter pemotongan memiliki pengaruh kompleks terhadap respon proses, sehingga optimasi parameter menjadi pendekatan penting untuk memperoleh keseimbangan antara kualitas permukaan dan produktivitas pemesinan (Elbah et al., 2022; Patel et al., 2023). Di antara berbagai parameter tersebut, kecepatan spindel menjadi salah satu faktor penting karena menentukan kecepatan potong yang terjadi pada zona kontak antara pahat dan benda kerja. Perubahan kecepatan spindel akan memengaruhi mekanisme pembentukan geram, gaya pemotongan, temperatur pemotongan, stabilitas proses, dan akhirnya menentukan karakteristik permukaan hasil pemesinan (Putra et al., 2023). Penelitian mengenai optimasi parameter CNC turning menunjukkan bahwa kombinasi parameter pemotongan memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan, sehingga pemilihan parameter yang tepat diperlukan untuk memperoleh kualitas permukaan terbaik.

Secara teoritis, hubungan antara parameter pemotongan dan kualitas permukaan dapat dijelaskan melalui teori mekanika pemotongan logam (*metal cutting theory*). Pada proses pembubutan, material mengalami deformasi plastis akibat interaksi antara mata potong pahat dan benda kerja. Kecepatan pemotongan yang terlalu rendah dapat menyebabkan pembentukan geram yang tidak stabil serta peningkatan gesekan antara pahat dan benda kerja, sedangkan kecepatan yang terlalu tinggi dapat meningkatkan temperatur pemotongan dan menyebabkan perubahan kondisi kontak pada zona pemotongan. Kondisi optimum terjadi ketika parameter pemotongan mampu menghasilkan keseimbangan antara pembentukan geram, gaya pemotongan, temperatur, dan kestabilan proses. Studi mengenai mekanisme pemotongan menunjukkan bahwa perubahan parameter pemesinan dapat memengaruhi temperatur pemotongan, gaya pemotongan, serta mekanisme keausan pahat yang selanjutnya berpengaruh terhadap kualitas permukaan benda kerja (Zhang et al., 2022; El Rayes et al., 2023). Dengan demikian, peningkatan kecepatan spindel tidak selalu menghasilkan permukaan yang semakin halus, tetapi dapat menghasilkan pola perubahan yang bersifat nonlinier tergantung pada karakteristik material, jenis pahat, dan kondisi mesin yang digunakan.

Material yang menjadi perhatian dalam penelitian ini adalah baja paduan rendah SCr420H yang banyak digunakan pada industri otomotif, khususnya untuk komponen yang membutuhkan kombinasi antara kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan aus seperti roda gigi, poros, dan komponen transmisi. Material SCr420H memiliki kandungan kromium yang memberikan kemampuan pengerasan (*hardenability*) serta meningkatkan ketahanan terhadap beban dan gesekan. Karakteristik tersebut menjadikan material ini sesuai untuk aplikasi dengan tuntutan performa tinggi, tetapi pada saat yang sama memerlukan pengaturan parameter pemesinan yang tepat agar kualitas permukaan hasil proses produksi tetap memenuhi standar. Berdasarkan kajian pada tesis, SCr420H dipilih

karena memiliki kemampuan pemesinan (*machinability*) yang baik sebelum proses perlakuan panas, namun kualitas permukaan hasil pemesinan tetap sangat bergantung pada pemilihan parameter pemotongan yang digunakan.

Permasalahan utama dalam proses CNC turning material SCr420H adalah belum adanya parameter pemesinan yang secara spesifik dapat dijadikan acuan untuk menghasilkan kualitas permukaan optimal pada kondisi mesin tertentu. Setiap kombinasi material, mesin CNC, insert pahat, dan parameter pemotongan memiliki karakteristik respon yang berbeda. Penelitian sebelumnya banyak melakukan analisis kekasaran permukaan menggunakan material seperti AISI 4140, aluminium alloy, EN24 steel, maupun baja karbon lainnya dengan metode optimasi Taguchi, ANOVA, dan eksperimen variasi parameter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spindle speed merupakan salah satu parameter yang memberikan kontribusi terhadap perubahan kekasaran permukaan. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kecepatan potong dan parameter pemesinan lainnya memiliki pengaruh signifikan terhadap perubahan kekasaran permukaan, baik pada baja paduan maupun material teknik lainnya. Optimasi parameter menggunakan pendekatan eksperimen maupun metode statistik seperti Taguchi dan response surface methodology telah banyak diterapkan untuk memperoleh kondisi pemotongan yang optimal (Kumar et al., 2022; Hantang et al., 2023; Singh et al., 2021). Misalnya, penelitian pada proses CNC turning aluminium alloy menunjukkan bahwa variasi spindle speed, feed rate, dan depth of cut berpengaruh terhadap nilai kekasaran permukaan yang diperoleh (Putra et al., 2023). Penelitian lain pada material EN24 steel juga menunjukkan bahwa parameter pemesinan termasuk spindle speed memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik permukaan hasil pembubutan CNC (Vignesh, 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah membahas hubungan parameter pemesinan terhadap kekasaran permukaan, masih terdapat keterbatasan kajian yang secara khusus membahas material SCr420H menggunakan mesin CNC Turning Mazak Quick Turn Smart 250. Sebagian besar penelitian terdahulu menggunakan jenis material, mesin, maupun kombinasi parameter yang berbeda sehingga hasil penelitian tidak dapat langsung diterapkan pada kondisi pemesinan lainnya. Perbedaan karakteristik material, geometri pahat, dan konfigurasi mesin menyebabkan respon proses pemesinan bersifat spesifik terhadap kondisi eksperimen yang digunakan (Mohan et al., 2021; Ramesh et al., 2021). Karakteristik suatu proses CNC turning sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara sifat material, geometri pahat, kekakuan mesin, dan parameter pemotongan yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian eksperimental secara langsung untuk memperoleh hubungan empiris antara variasi kecepatan spindel dan kekasaran permukaan material SCr420H pada kondisi pemesinan aktual. Research gap tersebut menjadi dasar pentingnya penelitian ini karena data mengenai pengaruh spindle speed terhadap kualitas permukaan SCr420H pada mesin Mazak Quick Turn Smart 250 masih terbatas. Pernyataan tersebut juga sesuai dengan kajian awal penelitian yang menunjukkan bahwa studi spesifik mengenai material SCr420H pada mesin tersebut masih belum banyak dilakukan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan spindel terhadap kekasaran permukaan material SCr420H hasil proses CNC turning menggunakan mesin Mazak Quick Turn Smart 250. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dengan memvariasikan kecepatan spindel sebesar 1200, 1400, 1600, 1800, dan 2000 rpm, sementara parameter lainnya dipertahankan konstan untuk mengetahui pengaruh spesifik dari perubahan kecepatan spindel terhadap nilai kekasaran permukaan. Pengukuran dilakukan berdasarkan

parameter Ra dan Rz sebagai indikator kualitas permukaan hasil pemesinan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan kajian parameter pemesinan CNC turning serta memberikan referensi praktis bagi industri manufaktur dalam menentukan kondisi pemotongan yang mampu menghasilkan kualitas permukaan optimal, meningkatkan efisiensi produksi, dan mengurangi risiko kegagalan produk akibat kualitas permukaan yang tidak memenuhi standar.

LANDASAN TEORI

CNC Turning dan Parameter Pemesinan

Proses *computer numerical control (CNC) turning* merupakan salah satu metode pemesinan yang banyak digunakan pada industri manufaktur presisi karena mampu menghasilkan komponen dengan tingkat akurasi geometrik dan konsistensi tinggi. Menurut Kumar et al. (2022), performa proses CNC turning sangat dipengaruhi oleh interaksi antara parameter pemotongan, karakteristik material benda kerja, dan kondisi pahat yang digunakan. Parameter seperti kecepatan spindel (*spindle speed*), gerak makan (*feed rate*), dan kedalaman pemotongan (*depth of cut*) memiliki kontribusi signifikan terhadap gaya pemotongan, temperatur pemesinan, serta kualitas permukaan hasil akhir.

Dalam penelitian mengenai optimasi proses pemesinan, Patel et al. (2023) menjelaskan bahwa perubahan parameter pemotongan dapat menghasilkan perubahan mekanisme pembentukan geram dan kestabilan kontak antara pahat dengan benda kerja. Kondisi tersebut menyebabkan kualitas hasil pemesinan tidak hanya bergantung pada satu parameter tunggal, tetapi merupakan hasil interaksi beberapa variabel proses.

Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Kekasaran Permukaan

Kecepatan spindel merupakan parameter pemotongan yang menentukan frekuensi putaran benda kerja selama proses pembubutan. Perubahan nilai spindle speed akan memengaruhi kecepatan potong, temperatur pada zona pemotongan, serta mekanisme deformasi material. Akgün dan Kara (2021) menyatakan bahwa peningkatan kecepatan pemotongan pada kondisi tertentu mampu meningkatkan kualitas permukaan karena menghasilkan proses pemotongan yang lebih stabil dan mengurangi pembentukan *built-up edge* pada ujung pahat.

Namun, peningkatan spindle speed yang terlalu tinggi tidak selalu memberikan hasil permukaan yang lebih baik. Berdasarkan penelitian Singh et al. (2022), peningkatan kecepatan pemotongan dapat meningkatkan temperatur pemotongan yang menyebabkan percepatan keausan pahat sehingga berpotensi meningkatkan nilai kekasaran permukaan. Oleh karena itu, hubungan antara spindle speed dan surface roughness memiliki kecenderungan nonlinier dan perlu dianalisis berdasarkan karakteristik material serta kondisi pemesinan.

Kekasaran Permukaan pada Proses CNC Turning

Kekasaran permukaan merupakan salah satu indikator utama dalam menentukan kualitas komponen hasil pemesinan. Nilai kekasaran permukaan yang rendah menunjukkan tingkat kehalusan permukaan yang lebih baik dan berpengaruh terhadap karakteristik fungsional komponen seperti ketahanan aus, gesekan, dan umur penggunaan. Menurut Rahman et al. (2024), parameter kekasaran seperti Ra dan Rz banyak digunakan sebagai indikator evaluasi kualitas permukaan karena mampu merepresentasikan perubahan profil permukaan akibat variasi kondisi pemotongan.

Pada proses CNC turning, nilai kekasaran permukaan dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk parameter pemotongan, jenis material, serta geometri pahat. Penelitian Patel et al. (2021) menunjukkan bahwa kombinasi parameter pemesinan yang tepat mampu menghasilkan peningkatan kualitas permukaan tanpa meningkatkan konsumsi energi maupun mempercepat degradasi pahat.

Material Baja Paduan SCr420H dalam Proses Pemesinan

SCr420H merupakan baja paduan rendah kromium yang banyak digunakan pada komponen otomotif karena memiliki kombinasi kekuatan mekanik dan ketahanan aus yang baik. Karakteristik mekanik material baja paduan memberikan tantangan tersendiri dalam proses pemesinan karena membutuhkan pemilihan parameter pemotongan yang sesuai untuk memperoleh kualitas permukaan optimal. Menurut Liu et al. (2023), material baja paduan dengan kekerasan relatif tinggi memiliki kecenderungan menghasilkan temperatur pemotongan lebih besar sehingga diperlukan pengendalian parameter pemesinan secara tepat.

Pada aplikasi industri otomotif, proses finishing pada baja paduan menjadi tahap penting karena kualitas permukaan berhubungan langsung dengan performa komponen saat digunakan. Oleh sebab itu, analisis pengaruh spindle speed terhadap kekasaran permukaan material SCr420H diperlukan untuk memperoleh parameter pemotongan yang mampu menghasilkan kualitas permukaan optimal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif dengan pendekatan eksperimental satu faktor (*single factor experimental design*) untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan spindle terhadap kekasaran permukaan material SCr420H hasil proses CNC turning. Metode eksperimen dipilih karena penelitian berfokus pada pengujian hubungan sebab akibat antara parameter pemesinan sebagai variabel bebas dan karakteristik kualitas permukaan sebagai variabel respon. Variabel bebas yang digunakan adalah kecepatan spindle dengan lima tingkat variasi, yaitu 1200 rpm, 1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm, dan 2000 rpm. Sementara itu, parameter pemesinan lainnya dikontrol tetap untuk mengurangi pengaruh variabel pengganggu, meliputi kecepatan pemakanan (*feed rate*) sebesar 0,20 mm/rev, kedalaman pemotongan (*depth of cut*) sebesar 0,4 mm, radius ujung pahat (*nose radius*) sebesar 0,4 mm, jenis pahat sisip VNMG 160404-HQ, serta kondisi pemesinan tanpa menggunakan cairan pendingin (*dry machining*). Pendekatan eksperimental dengan pengendalian parameter pemotongan banyak digunakan dalam penelitian pemesinan untuk mengevaluasi hubungan antara parameter proses terhadap kualitas hasil pemotongan secara lebih akurat (Kumar et al., 2022).

Objek penelitian yang digunakan adalah material baja paduan SCr420H yang mengalami proses pembubutan akhir (*finishing process*) menggunakan mesin CNC Turning Mazak Quick Turn Smart 250. Mesin yang digunakan memiliki sistem kontrol Mazatrol Smart dengan konfigurasi dua sumbu (X dan Z), kecepatan spindle maksimum 4000 rpm, turret 12 station, chuck hidrolis berukuran 8 inci, serta kapasitas batang maksimum 65 mm. Material SCr420H dipilih karena banyak digunakan pada komponen otomotif yang membutuhkan karakteristik mekanik dan kualitas permukaan yang baik. Dalam proses pemesinan, perubahan parameter seperti kecepatan spindle dapat memengaruhi fenomena pemotongan, termasuk temperatur pemotongan, gaya potong, pembentukan geram, serta

interaksi antara pahat dan material yang akhirnya berpengaruh terhadap nilai kekasaran permukaan (Zhang et al., 2022).

Pengumpulan data dilakukan melalui eksperimen langsung sebagai sumber data primer dan kajian literatur sebagai sumber data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil proses pembubutan CNC terhadap material SCr420H pada setiap variasi kecepatan spindel yang telah ditentukan. Setelah proses pemesinan selesai, pengukuran kualitas permukaan dilakukan menggunakan alat uji kekasaran permukaan Surfcom 1800G untuk memperoleh parameter kekasaran berupa *average roughness* (Ra) dan *maximum height roughness* (Rz). Data sekunder diperoleh melalui berbagai publikasi ilmiah yang membahas pengaruh parameter pemotongan CNC turning terhadap karakteristik permukaan material logam. Literatur tersebut digunakan sebagai dasar teoritis dalam menentukan rancangan penelitian serta mendukung interpretasi hasil eksperimen.

Tahapan penelitian diawali dengan persiapan material uji dan pengaturan parameter pemesinan pada mesin CNC Turning Mazak Quick Turn Smart 250. Selanjutnya dilakukan proses pembubutan dengan variasi kecepatan spindel sesuai rancangan eksperimen. Setiap hasil pemesinan kemudian dilakukan pengujian kekasaran permukaan untuk memperoleh nilai Ra dan Rz. Data hasil pengukuran selanjutnya dianalisis secara kuantitatif menggunakan metode deskriptif dengan penyajian data dalam bentuk tabel dan grafik hubungan antara kecepatan spindel terhadap nilai kekasaran permukaan. Analisis dilakukan untuk mengetahui kecenderungan perubahan nilai kekasaran akibat peningkatan kecepatan spindel serta menentukan kondisi pemesinan yang menghasilkan kualitas permukaan terbaik. Evaluasi hubungan antara parameter pemotongan dan respon kualitas permukaan melalui analisis kuantitatif merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam penelitian optimasi proses pemesinan CNC (Singh et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan spindel terhadap karakteristik kekasaran permukaan material SCr420H pada proses *finishing* CNC turning menggunakan mesin Mazak Quick Turn Smart 250. Pengujian dilakukan dengan menerapkan lima tingkat variasi kecepatan spindel, yaitu 1200 rpm, 1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm, dan 2000 rpm. Seluruh proses pemesinan dilakukan dalam kondisi *dry machining* tanpa penggunaan cairan pendingin (*coolant*) untuk mempertahankan kondisi kontak langsung antara pahat dan benda kerja selama proses pemotongan.

Karakteristik permukaan hasil pemesinan dievaluasi menggunakan parameter kekasaran permukaan *average roughness* (Ra) dan *maximum height roughness* (Rz). Pengukuran dilakukan menggunakan *Surface Roughness Tester* Surfcom 1800G pada setiap spesimen hasil proses *finishing*. Setiap variasi kecepatan spindel dilakukan pengukuran sebanyak dua kali untuk memperoleh data yang lebih representatif. Hasil pengukuran nilai kekasaran permukaan pada masing-masing variasi kecepatan spindel disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

rpm	Ra ₁ (μm)	Ra ₂ (μm)	Ra rata-rata (μm)	Rz ₁ (μm)	Rz ₂ (μm)	Rz rata-rata (μm)
1200	3,243	4,114	3,679	22,002	26,027	24,015
1400	5,114	5,402	5,258	32,092	35,188	33,640
1600	6,283	5,600	5,942	40,746	32,875	36,811

1800	6,345	4,678	5,512	38,559	31,065	34,812
2000	3,334	3,488	3,411	21,677	22,465	22,071

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 1, variasi kecepatan spindle menghasilkan perubahan nilai kekasaran permukaan yang berbeda pada material SCr420H. Nilai kekasaran rata-rata (*average roughness*, Ra) terendah diperoleh pada kecepatan spindle 2000 rpm dengan nilai sebesar 3,411 μm , sedangkan nilai tertinggi terjadi pada kecepatan 1600 rpm sebesar 5,942 μm . Pola yang sama juga ditunjukkan oleh parameter *maximum height roughness* (Rz), dengan nilai minimum sebesar 22,071 μm pada kecepatan 2000 rpm dan nilai maksimum sebesar 36,811 μm pada kecepatan 1600 rpm.

Perbedaan nilai kekasaran tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindle tidak secara langsung menghasilkan penurunan atau peningkatan kekasaran permukaan secara konsisten. Hubungan antara kecepatan spindle dan karakteristik permukaan menunjukkan kecenderungan nonlinier, di mana perubahan kondisi pemotongan akibat variasi kecepatan spindle memengaruhi mekanisme pembentukan permukaan selama proses *finishing* CNC turning.

Perhitungan Nilai Kekasaran Aktual

Perhitungan nilai kekasaran permukaan aktual dilakukan untuk memperoleh nilai representatif dari hasil pengukuran pada setiap variasi kecepatan spindle. Data rata-rata kekasaran permukaan digunakan sebagai parameter utama dalam mengevaluasi pengaruh kecepatan spindle terhadap karakteristik permukaan material SCr420H setelah proses *finishing* CNC turning. Nilai rata-rata diperoleh dari dua kali pengukuran pada setiap kondisi pemotongan untuk meningkatkan representasi data hasil pengujian.

Nilai rata-rata parameter kekasaran permukaan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$R_{avg} = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

Berdasarkan hasil perhitungan parameter *average roughness* (Ra), diperoleh nilai rata-rata kekasaran permukaan pada masing-masing variasi kecepatan spindle. Pada kecepatan 1200 rpm, nilai Ra aktual sebesar 3,679 μm yang diperoleh dari rata-rata dua hasil pengukuran sebesar 3,243 μm dan 4,114 μm . Selanjutnya, pada kecepatan 1400 rpm diperoleh nilai Ra sebesar 5,258 μm dari hasil pengukuran 5,114 μm dan 5,402 μm . Peningkatan nilai Ra terjadi pada kecepatan 1600 rpm dengan nilai sebesar 5,942 μm , berdasarkan hasil pengukuran 6,283 μm dan 5,600 μm . Pada kecepatan 1800 rpm nilai Ra mengalami penurunan menjadi 5,512 μm , sedangkan nilai Ra terendah diperoleh pada kecepatan 2000 rpm dengan nilai 3,411 μm dari hasil pengukuran 3,334 μm dan 3,488 μm .

Selain parameter Ra, analisis kekasaran permukaan juga dilakukan menggunakan parameter *maximum height roughness* (Rz). Nilai rata-rata Rz dihitung menggunakan persamaan:

$$R_{Zavg} = \frac{R_{z1} + R_{z2}}{2}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai Rz mengalami kecenderungan perubahan yang serupa dengan parameter Ra. Pada kecepatan spindle 1200 rpm diperoleh

nilai Rz sebesar 24,015 μm , sedangkan pada 1400 rpm meningkat menjadi 33,640 μm . Nilai Rz tertinggi terjadi pada kecepatan 1600 rpm dengan nilai 36,811 μm . Setelah mencapai kondisi tersebut, nilai Rz mengalami penurunan pada kecepatan 1800 rpm menjadi 34,812 μm dan mencapai nilai minimum pada kecepatan 2000 rpm sebesar 22,071 μm .

Berdasarkan hasil perhitungan kedua parameter kekasaran permukaan tersebut, terlihat bahwa perubahan kecepatan spindel menghasilkan pola yang sama antara nilai Ra dan Rz. Nilai kekasaran meningkat dari kecepatan 1200 rpm hingga mencapai nilai maksimum pada 1600 rpm, kemudian mengalami penurunan pada kecepatan yang lebih tinggi hingga mencapai nilai terendah pada 2000 rpm. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel pada proses *dry machining* tidak selalu menghasilkan peningkatan kualitas permukaan secara linear. Perubahan karakteristik permukaan dipengaruhi oleh interaksi antara kecepatan pemotongan, kondisi kontak pahat dengan benda kerja, pembentukan geram, serta perubahan temperatur selama proses pemesinan.

Perhitungan Kekasaran Teoritis Hasil *Turning*

Perhitungan kekasaran permukaan teoritis dilakukan untuk memperoleh nilai prediksi kekasaran geometris berdasarkan parameter pemotongan yang digunakan selama proses *finishing* CNC turning. Nilai teoritis ini digunakan sebagai acuan pembandingan terhadap hasil pengukuran aktual untuk mengevaluasi pengaruh faktor-faktor pemesinan yang terjadi selama proses pemotongan. Pada penelitian ini, parameter geometris pahat dan kondisi pemotongan yang digunakan dibuat tetap pada seluruh variasi pengujian, yaitu *feed rate* sebesar 0,20 mm/rev dan *nose radius* insert sebesar 0,4 mm. Insert yang digunakan pada proses *finishing* adalah VNMG 160404-HQ.

Karena nilai *feed rate* dan *nose radius* tidak mengalami perubahan pada setiap variasi kecepatan spindel, maka nilai kekasaran teoritis secara geometris memiliki nilai yang konstan. Nilai kekasaran teoritis parameter *average roughness* (Ra) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$R_a = \frac{f^2}{32r} \times 1000$$

Dengan memasukkan nilai parameter pemotongan yang digunakan:

$$R_a = \frac{(0,20)^2}{32 \cdot 0,4} \times 1000 = 3,125 \mu\text{m}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, nilai Ra teoritis yang diperoleh sebesar 3,125 μm .

Selanjutnya, nilai kekasaran teoritis berdasarkan parameter *maximum height roughness* (Rz) dihitung menggunakan persamaan:

$$R_z = \frac{f^2}{8r} \times 1000$$

Substitusi nilai parameter pemotongan menghasilkan:

$$R_z = \frac{(0,20)^2}{8,0,4} \times 1000 = 12,5 \mu\text{m}$$

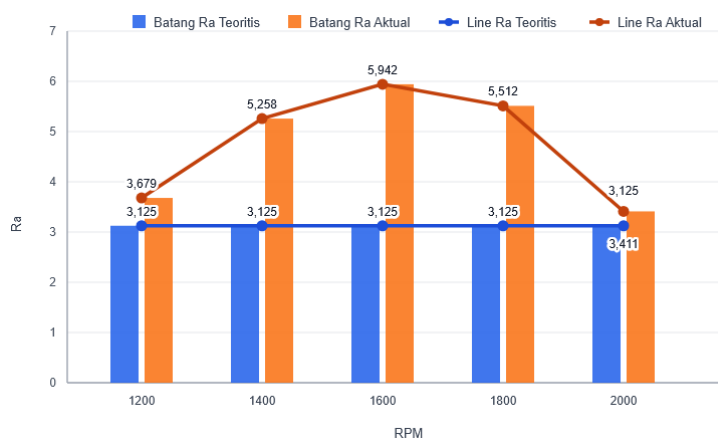
Dengan demikian, nilai R_z teoritis yang diperoleh sebesar $12,5 \mu\text{m}$.

Nilai kekasaran teoritis tersebut kemudian digunakan sebagai parameter pembandingan terhadap nilai kekasaran aktual hasil pengukuran menggunakan *Surface Roughness Tester* Surfcom 1800G. Perbandingan antara nilai teoritis dan aktual bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara kondisi pemotongan ideal berdasarkan geometri pahat dengan kondisi pemesinan sebenarnya, yang dipengaruhi oleh faktor lain seperti getaran mesin (*chatter*), deformasi material, pembentukan geram, keausan pahat, serta fenomena termal selama proses pemotongan.

Perbandingan Ra Teoritis dan Ra Aktual

Tabel 2. Perbandingan Ra Teoritis dan Ra Aktual

RPM	Ra Teoritis	Ra Aktual	Selisih
1200	3,125	3,679	0,554
1400	3,125	5,258	2,133
1600	3,125	5,942	2,817
1800	3,125	5,512	2,387
2000	3,125	3,411	0,286



Grafik 1. Perbandingan Ra Teoritis dan Ra Aktual

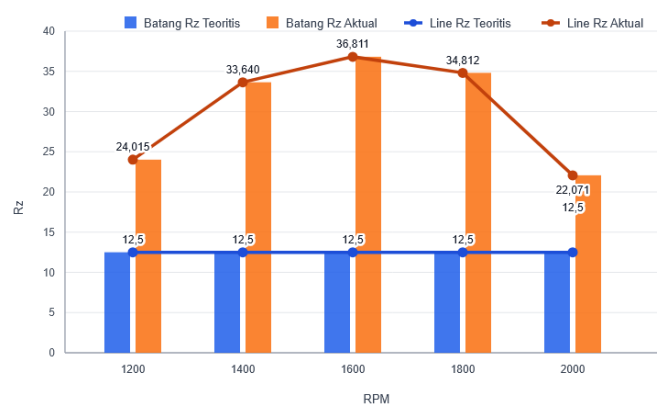
Berdasarkan perbandingan antara nilai teoritis dan hasil pengukuran aktual pada Tabel 2, seluruh variasi kecepatan spindel menunjukkan nilai Ra aktual yang lebih besar dibandingkan nilai Ra teoritis sebesar $3,125 \mu\text{m}$. Perbedaan terkecil antara nilai aktual dan teoritis diperoleh pada kecepatan spindel 2000 rpm dengan selisih sebesar $0,286 \mu\text{m}$, sedangkan perbedaan terbesar terjadi pada kecepatan 1600 rpm dengan selisih sebesar $2,817 \mu\text{m}$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi pemotongan pada kecepatan spindel 2000 rpm menghasilkan karakteristik permukaan yang paling mendekati nilai teoritis berdasarkan geometri pahat dan parameter pemotongan yang digunakan. Perbedaan antara nilai teoritis dan aktual menunjukkan adanya pengaruh faktor pemesinan aktual,

seperti fenomena getaran, kondisi kontak pahat dengan benda kerja, pembentukan geram, serta perubahan kondisi pemotongan selama proses finishing CNC turning.

Perbandingan Rz Teoritis dan Rz Aktual

Tabel 3. Perbandingan Rz Teoritis dan Rz Aktual

RPM	Rz Teoritis	Rz Aktual	Selisih
1200	12,5	24,015	11,515
1400	12,5	33,640	21,140
1600	12,5	36,811	24,311
1800	12,5	34,812	22,312
2000	12,5	22,071	9,571



Grafik 2. Perbandingan Rz Teoritis dan Rz Aktual

Berdasarkan hasil perbandingan pada Tabel 3, seluruh nilai Rz hasil pengukuran aktual menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan nilai Rz teoritis sebesar 12,5 μm . Selisih nilai terkecil diperoleh pada kecepatan spindel 2000 rpm dengan perbedaan sebesar 9,571 μm , sedangkan selisih terbesar terjadi pada kecepatan 1600 rpm dengan perbedaan sebesar 24,311 μm . Hasil tersebut menunjukkan bahwa profil permukaan hasil pemesian aktual memiliki tingkat ketidakrataan yang lebih besar dibandingkan prediksi teoritis berdasarkan pendekatan geometris pahat.

Perbedaan antara nilai Rz teoritis dan aktual menunjukkan bahwa model teoritis yang digunakan hanya merepresentasikan kontribusi geometris dari parameter *feed rate* dan *nose radius* terhadap pembentukan profil permukaan. Pada kondisi pemesian sebenarnya, karakteristik permukaan dipengaruhi oleh berbagai fenomena selama proses pemotongan, seperti interaksi gesekan antara pahat dan benda kerja, peningkatan temperatur pada zona pemotongan, pembentukan *built-up edge* (BUE), getaran sistem pemesian (*chatter*), kestabilan proses pemotongan, serta perubahan kondisi pahat selama proses berlangsung. Faktor-faktor tersebut menyebabkan profil permukaan aktual mengalami penyimpangan dari kondisi ideal sehingga menghasilkan nilai kekasaran yang lebih tinggi dibandingkan hasil perhitungan teoritis.

Klasifikasi Kekasaran Menurut ISO/DIN 4763:1981

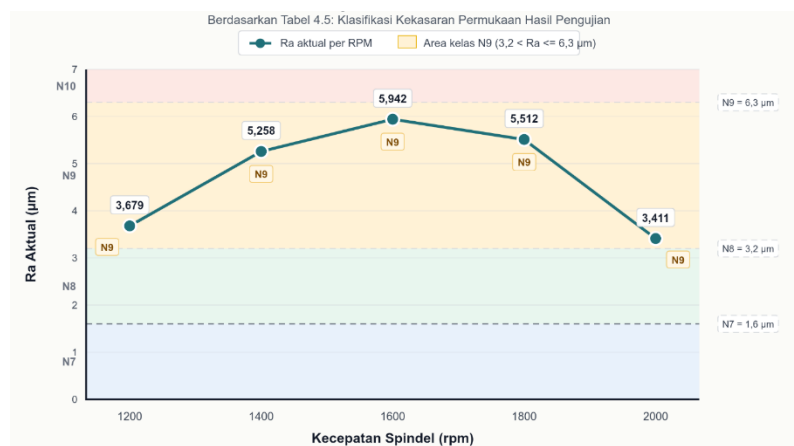
Untuk mengevaluasi tingkat kualitas permukaan hasil proses *finishing* CNC turning, nilai kekasaran rata-rata (*average roughness*, Ra) hasil pengukuran aktual diklasifikasikan

berdasarkan standar ISO/DIN 4763:1981. Klasifikasi ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan kategori tingkat kekasaran permukaan berdasarkan nilai Ra yang diperoleh pada setiap variasi kecepatan spindel. Dengan pendekatan tersebut, hasil pengujian tidak hanya dianalisis berdasarkan nilai numerik, tetapi juga dapat menunjukkan tingkat kualitas permukaan yang dihasilkan setelah proses pemesinan.

Berdasarkan hasil klasifikasi terhadap nilai Ra aktual, setiap variasi kecepatan spindel menunjukkan kategori kekasaran permukaan yang berbeda. Hasil klasifikasi kekasaran permukaan material SCr420H berdasarkan standar ISO/DIN 4763:1981 disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Klasifikasi Kekasaran Permukaan Hasil Pengujian

RPM	Ra Aktual	Kelas
1200	3,679	N9
1400	5,258	N9
1600	5,942	N9
1800	5,512	N9
2000	3,411	N9



Grafik 3. Ra terhadap Klasifikasi ISO/DIN 4763:1981

Berdasarkan hasil klasifikasi kekasaran permukaan mengacu pada standar ISO, nilai Ra aktual yang diperoleh pada penelitian ini berada dalam rentang kelas N8 hingga N9 dengan interval kekasaran 3,2–6,3 µm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses *finishing* CNC turning pada material SCr420H menghasilkan karakteristik permukaan yang berada pada kategori pemesinan dengan tingkat kehalusan menengah hingga baik. Perbedaan kelas kekasaran pada setiap variasi kecepatan spindel menunjukkan bahwa perubahan parameter pemotongan memberikan pengaruh terhadap karakteristik permukaan yang dihasilkan.

Klasifikasi tersebut juga menunjukkan bahwa nilai kekasaran aktual tidak hanya dipengaruhi oleh faktor geometris pahat dan parameter *feed rate*, tetapi merupakan hasil interaksi berbagai fenomena selama proses pemotongan berlangsung. Faktor seperti temperatur pada zona pemotongan, kestabilan sistem pemesinan, getaran selama proses (*chatter*), kondisi kontak antara pahat dan benda kerja, serta mekanisme gesekan (*tribological interaction*) turut berkontribusi terhadap pembentukan profil permukaan aktual. Dengan demikian, evaluasi kualitas permukaan hasil CNC turning perlu

mempertimbangkan kondisi pemesinan secara keseluruhan, tidak hanya berdasarkan parameter teoritis.

Pengaruh Variasi Kecepatan Spindel terhadap Ra



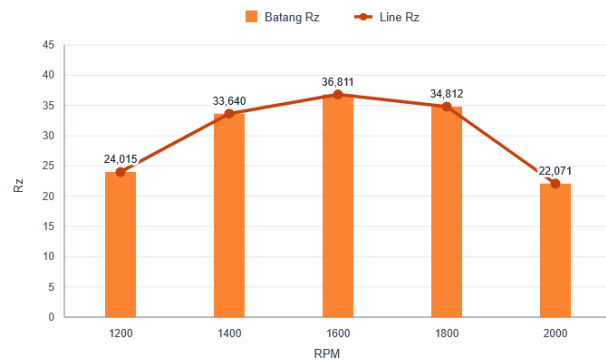
Grafik 4. Kecepatan Spindel vs Ra

Hubungan antara variasi kecepatan spindel terhadap nilai kekasaran permukaan rata-rata (*average roughness*, Ra) menunjukkan kecenderungan perubahan yang tidak linier. Pada kecepatan spindel 1200 rpm diperoleh nilai Ra sebesar 3,679 μm , kemudian meningkat menjadi 5,258 μm pada 1400 rpm dan mencapai nilai maksimum sebesar 5,942 μm pada 1600 rpm. Setelah mencapai kondisi tersebut, nilai Ra mengalami penurunan menjadi 5,512 μm pada 1800 rpm dan mencapai nilai terendah sebesar 3,411 μm pada kecepatan 2000 rpm.

Fenomena tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel tidak selalu menghasilkan penurunan nilai kekasaran permukaan secara langsung. Pada rentang 1200–1600 rpm, peningkatan kecepatan spindel justru menyebabkan kenaikan nilai Ra, yang menunjukkan bahwa kondisi pemotongan pada rentang tersebut belum menghasilkan kestabilan proses yang optimal. Perubahan nilai kekasaran ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor selama proses pemesinan, seperti perubahan gaya pemotongan, getaran sistem, pembentukan *built-up edge* (BUE), peningkatan temperatur pada zona pemotongan, serta perubahan mekanisme kontak antara pahat dan benda kerja.

Pada kecepatan spindel yang lebih tinggi, yaitu 1800–2000 rpm, nilai Ra mengalami penurunan yang menunjukkan adanya peningkatan kestabilan proses pemotongan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pada parameter pemotongan tertentu, peningkatan kecepatan spindel dapat menghasilkan interaksi pemotongan yang lebih efektif sehingga mampu memperbaiki kualitas permukaan hasil *finishing* CNC turning.

Pengaruh Variasi Kecepatan Spindel terhadap Rz



Grafik 5. Kecepatan Spindel vs Rz

Pola perubahan yang serupa juga ditunjukkan oleh parameter *maximum height roughness* (Rz) pada setiap variasi kecepatan spindel. Nilai Rz meningkat dari 24,015 μm pada kecepatan 1200 rpm menjadi 33,640 μm pada 1400 rpm, kemudian mencapai nilai tertinggi sebesar 36,811 μm pada 1600 rpm. Setelah melewati kondisi tersebut, nilai Rz mengalami penurunan menjadi 34,812 μm pada 1800 rpm dan mencapai nilai minimum sebesar 22,071 μm pada kecepatan 2000 rpm.

Parameter Rz menggambarkan karakteristik vertikal profil permukaan melalui perbedaan tinggi antara puncak dan lembah permukaan hasil pemesinan. Peningkatan nilai Rz pada rentang 1400–1800 rpm menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut terbentuk profil permukaan dengan ketidakrataan yang lebih besar dibandingkan kondisi pemotongan pada 1200 rpm dan 2000 rpm. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan kecepatan spindel memengaruhi mekanisme pembentukan profil permukaan selama proses *finishing* CNC turning. Oleh karena itu, kualitas permukaan yang dihasilkan tidak hanya bergantung pada nilai kecepatan spindel secara individual, tetapi juga dipengaruhi oleh kestabilan proses pemotongan, interaksi antara pahat dan benda kerja, serta kondisi dinamis selama proses pemesinan berlangsung.

Penentuan Kecepatan Spindle Optimum

Penentuan kondisi kecepatan spindel optimum dilakukan dengan mempertimbangkan parameter kekasaran permukaan aktual, yaitu nilai **Ra** dan **Rz**, serta tingkat kedekatan antara hasil pengukuran aktual terhadap nilai kekasaran teoritis. Kecepatan spindel optimum ditentukan berdasarkan kondisi pemotongan yang mampu menghasilkan nilai kekasaran permukaan paling rendah dan memiliki karakteristik permukaan yang mendekati prediksi teoritis. Hasil evaluasi penentuan kecepatan spindel optimum pada proses *finishing* CNC turning material SCr420H disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Kecepatan Spindel Optimum

RPM	Ra (μm)	Rz (μm)
2000	3,411	22,071

Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 5, kecepatan spindel 2000 rpm menghasilkan nilai kekasaran permukaan terendah dibandingkan seluruh variasi pengujian lainnya. Pada kondisi tersebut, nilai Ra dan Rz masing-masing mencapai 3,411 μm dan 22,071 μm .

Selain menghasilkan nilai kekasaran aktual minimum, variasi kecepatan 2000 rpm juga menunjukkan tingkat penyimpangan terkecil terhadap nilai kekasaran teoritis, dengan selisih sebesar 0,286 μm untuk parameter Ra dan 9,571 μm untuk parameter Rz.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi pemotongan pada kecepatan spindle 2000 rpm memberikan karakteristik permukaan yang paling mendekati pendekatan teoritis berdasarkan parameter geometris pahat dan kondisi pemotongan yang diterapkan. Dengan mempertimbangkan nilai kekasaran aktual yang rendah serta deviasi terhadap nilai teoritis yang minimum, kecepatan spindle 2000 rpm ditetapkan sebagai kondisi pemotongan optimum pada penelitian ini untuk proses *finishing* CNC turning material SCr420H.

Kondisi optimum tersebut diperoleh pada kombinasi parameter pemesian berupa penggunaan insert VNMG 160404-HQ, *feed rate* sebesar 0,20 mm/rev, *depth of cut* sebesar 0,4 mm, serta kondisi pemotongan tanpa penggunaan cairan pendingin (*dry machining*).

Perhitungan Parameter Pemesian

Selain evaluasi terhadap karakteristik kekasaran permukaan, penelitian ini juga melakukan analisis terhadap parameter pemesian yang meliputi kecepatan potong (*cutting speed*, V_c), kecepatan pemakanan (*feed rate speed*, V_f), dan laju pelepasan material (*Material Removal Rate*, MRR). Perhitungan parameter tersebut dilakukan untuk mengetahui perubahan kondisi pemotongan akibat variasi kecepatan spindle selama proses *finishing* CNC turning. Parameter perhitungan menggunakan kondisi pemesian yang sama dengan pengujian kekasaran permukaan, yaitu diameter benda kerja hasil proses *finishing* sebesar 20 mm, *feed rate* sebesar 0,20 mm/rev, dan *depth of cut* sebesar 0,4 mm.

Kecepatan potong (V_c) dihitung berdasarkan hubungan antara diameter benda kerja dan kecepatan rotasi spindle menggunakan persamaan:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindle menyebabkan kenaikan nilai kecepatan potong secara proporsional. Pada kecepatan spindle 1200 rpm diperoleh nilai V_c sebesar 75,36 m/min, kemudian meningkat berturut-turut menjadi 87,92 m/min pada 1400 rpm, 100,48 m/min pada 1600 rpm, 113,04 m/min pada 1800 rpm, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 125,60 m/min pada 2000 rpm.

Selanjutnya, kecepatan pemakanan (V_f) dihitung berdasarkan hubungan antara *feed rate* dan putaran spindle menggunakan persamaan:

$$V_f = f \times N$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai V_f mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan spindle. Pada variasi 1200 rpm, nilai V_f sebesar 240 mm/min, sedangkan pada kecepatan 1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm, dan 2000 rpm masing-masing diperoleh nilai sebesar 280 mm/min, 320 mm/min, 360 mm/min, dan 400 mm/min.

Selain itu, nilai *Material Removal Rate* (MRR) dihitung untuk mengetahui kemampuan pelepasan material pada setiap kondisi pemotongan menggunakan persamaan:

$$MRR = \pi \cdot D \cdot N \cdot f \cdot ap$$

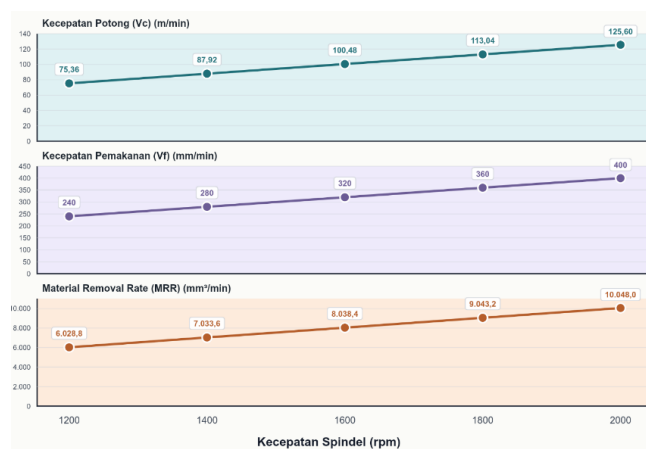
Berdasarkan hasil perhitungan, nilai MRR meningkat secara linear mengikuti peningkatan kecepatan spindle. Nilai MRR terendah diperoleh pada kecepatan 1200 rpm sebesar 6.028,8 mm³/min, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada kecepatan 2000 rpm sebesar 10.048,0 mm³/min. Pada variasi kecepatan 1400 rpm, 1600 rpm, dan 1800 rpm diperoleh nilai MRR berturut-turut sebesar 7.033,6 mm³/min, 8.038,4 mm³/min, dan 9.043,2 mm³/min.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindle memberikan pengaruh langsung terhadap peningkatan kecepatan potong, kecepatan pemakanan, dan laju pelepasan material. Namun, peningkatan produktivitas pemesinan tersebut perlu dipertimbangkan bersama dengan karakteristik kualitas permukaan yang dihasilkan, karena kondisi pemotongan dengan MRR tinggi tidak selalu menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang lebih rendah. Oleh karena itu, evaluasi parameter produktivitas dan kualitas permukaan perlu dilakukan secara bersamaan untuk menentukan kondisi pemesinan yang optimal.

Tabel 6. Perhitungan Parameter Pemesinan

RPM	Vc (m/min)	Vf (mm/min)	MRR (mm ³ /min)
1200	75,36	240	6.028,8
1400	87,92	280	7.033,6
1600	100,48	320	8.038,4
1800	113,04	360	9.043,2
2000	125,60	400	10.048,0

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 6, peningkatan kecepatan spindle menghasilkan kenaikan nilai kecepatan potong (*cutting speed*, Vc), kecepatan pemakanan (*feed speed*, Vf), dan *Material Removal Rate* (MRR). Perubahan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan putaran spindle secara langsung meningkatkan intensitas proses pemotongan serta kemampuan pelepasan material selama proses *finishing* CNC turning. Namun, peningkatan parameter pemesinan tersebut tidak secara langsung menghasilkan perubahan kekasaran permukaan yang berbanding lurus.



Grafik 6. RPM terhadap Vc, Vf, MRR

Pada rentang kecepatan spindel 1200–1600 rpm, peningkatan nilai V_c , V_f , dan MRR diikuti oleh peningkatan nilai R_a dan R_z . Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas pemesian pada rentang tersebut belum menghasilkan perbaikan kualitas permukaan. Fenomena tersebut dapat dikaitkan dengan perubahan kondisi pemotongan selama proses berlangsung, seperti peningkatan temperatur pada zona pemotongan, perubahan gaya pemotongan, interaksi gesekan antara pahat dan benda kerja, serta kestabilan pembentukan geram. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan penyimpangan profil permukaan aktual dari kondisi teoritis meskipun parameter pemotongan mengalami peningkatan.

Menariknya, pada kecepatan spindel 2000 rpm, nilai V_c , V_f , dan MRR mencapai nilai tertinggi, tetapi menghasilkan nilai R_a dan R_z terendah dibandingkan variasi lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi pemotongan tersebut, sistem pemesian mampu mencapai kondisi yang lebih stabil sehingga menghasilkan pembentukan permukaan yang lebih baik. Dengan demikian, peningkatan kecepatan spindel tidak selalu memberikan pengaruh negatif terhadap kualitas permukaan, tetapi bergantung pada kesesuaian antara parameter pemotongan, karakteristik material, geometri pahat, dan kondisi dinamis selama proses CNC turning berlangsung.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan kecepatan spindel pada proses CNC turning dry process memberikan pengaruh terhadap peningkatan nilai kecepatan potong (*cutting speed*), kecepatan pemakanan (*feed speed*), dan *Material Removal Rate* (MRR). Namun, peningkatan produktivitas pemesian tersebut tidak selalu menghasilkan penurunan kekasaran permukaan secara linier. Perubahan kualitas permukaan dipengaruhi oleh keseimbangan antara parameter pemotongan dan kondisi stabilitas proses selama pemesian.

Variasi kecepatan spindel menunjukkan bahwa kondisi pemotongan optimum diperoleh pada kecepatan spindel tertentu, yaitu saat peningkatan produktivitas masih diikuti dengan kualitas permukaan yang lebih baik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan parameter pemesian perlu mempertimbangkan hubungan antara laju pelepasan material dan karakteristik permukaan yang dihasilkan, sehingga dapat diperoleh proses pemesian yang efektif dan menghasilkan kualitas produk sesuai kebutuhan.

DAFTAR REFERENSI

- Akgün, M., & Kara, F. (2021). Analysis and optimization of cutting tool coating effects on surface roughness and cutting forces on turning of AA 6061 alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 6498261. <https://doi.org/10.1155/2021/6498261>
- Elbah, M., Yallese, M. A., & Khellaf, A. (2022). Modeling and optimization of machining parameters during turning using carbide insert tools. *Measurement*, 189, 110492. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110492>
- El Rayes, M. M., Abbas, A. T., Al-Abduljabbar, A. H., Ragab, A. E., Benyahia, F., & Elkaseer, A. (2023). Investigation and statistical analysis for optimizing surface roughness, cutting forces, temperature, and productivity in turning process. *Metals*, 13(6), 1098. <https://doi.org/10.3390/met13061098>

- Hantang, S., Khanthirat, W., Lawong, A., Warorot, W., & Sudsuansee, T. (2023). Optimizing surface roughness of steel material using CNC turning and Taguchi technique. *Journal of Engineering and Industrial Technology*, 43(2), 145–154. <https://doi.org/10.14456/jeit.2023.22>
- Kumar, R., Singh, J., & Kumar, P. (2022). Optimization of machining parameters for surface roughness and material removal rate in CNC turning using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2156–2162. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.315>
- Liu, X., Chen, M., & Zhao, J. (2023). Surface integrity evaluation in precision machining of alloy steels: Effects of cutting parameters and tool geometry. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1123–1138. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.091>
- Mohan, N. S., Ramachandra, A., & Kulkarni, S. M. (2021). Effect of cutting parameters on surface roughness during CNC turning of alloy steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1324–1333. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.046>
- Patel, V., Patel, K., & Desai, K. (2023). Experimental investigation and optimization of CNC turning parameters for improving surface quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126, 2845–2860. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11245-8>
- Putra, Y. M., Timuda, G. E., Darsono, N., Chollacoop, N., & Khaerudini, D. S. (2023). Optimization of machining parameters on the surface roughness of aluminum in CNC turning process using Taguchi method. *International Journal of Innovation in Mechanical Engineering and Advanced Materials*, 5(2), 56–62. <https://doi.org/10.22441/ijimeam.v5i2.21679>
- Rahman, M., Asad, A., & Islam, M. (2024). Assessment of surface roughness parameters in precision machining processes using Ra and Rz evaluation. *Measurement: Sensors*, 33, 101121. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101121>
- Ramesh, S., Karunamoorthy, L., & Palanikumar, K. (2021). Influence of machining parameters on surface roughness during turning of hardened steel using coated carbide inserts. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(8), 921–930. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1875307>
- Singh, R., Sharma, V., & Kumar, A. (2021). Analysis of cutting speed effects on surface roughness and tool performance during turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(6), 1450–1458. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.03.012>
- Vignesh, S. H. (2023). Surface roughness optimization of EN24 steel in CNC turning using Taguchi method. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 15(5). <https://doi.org/10.4273/ijvss.15.5.08>
- Wang, H., Li, B., & Zhang, S. (2022). Mechanical behavior and machinability characteristics of chromium alloy steels for automotive applications. *Materials Characterization*, 190, 112031. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112031>

Zhang, Y., Liu, Z., & Wang, X. (2022). Investigation of cutting temperature and tool wear mechanisms in turning of alloy steels. *Wear*, 504–505, 204414. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204414>