

ARTIKEL ORISINAL

Pengaruh G96 dan G97 terhadap Kekasaran Permukaan ST 37 dan S45C pada Pembubutan CNC

Adimas¹, N.F.P. Leksonowati^{1,*}, N.Pamungkas¹, B.Baharudin¹, D.Cahyagi¹, L.V.Gunawan²¹Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam, Kepulauan Riau, Indonesia²Teknik Mesin, Politeknik Negeri Indramayu, Jawa Barat, Indonesia

ABSTRAK – Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh mode Constant Cutting Speed (G96) dan Constant Spindle Speed (G97) terhadap kekasaran permukaan material ST 37 dan S45C pada proses pembubutan bertingkat menggunakan mesin CNC bubut. Metode eksperimen komparatif digunakan dengan pengukuran kekasaran permukaan (R_a) pada diameter bertingkat (16 mm, 24 mm, 32 mm, dan 35 mm) menggunakan alat Mitutoyo Surface Tester SJ-210. Hasil menunjukkan bahwa mode G96 menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah, dengan rata-rata (R_a) sebesar 2,22 μm (S45C) dan 2,27 μm (ST 37) dalam kelas N6, dibandingkan mode G97 dengan (R_a) 3,08 μm (S45C) dan 3,03 μm (ST 37) dalam kelas N7. Mode G96 lebih unggul karena kemampuan menyesuaikan kecepatan putaran otomatis berdasarkan diameter, sementara pada mode G97, diameter kecil dengan putaran tinggi (1273 rpm) meningkatkan kekasaran akibat getaran atau panas. Penelitian ini menyarankan penggunaan mode G96 untuk kehalusan permukaan optimal pada pembubutan bertingkat material sejenis

Kata kunci: Kekasaran permukaan, pembubutan bertingkat, G96, G97, CNC bubut

ABSTRACT – This study aims to compare the effects of Constant Cutting Speed (G96) and Constant Spindle Speed (G97) modes on the surface roughness of ST 37 and S45C materials in step-turning processes using a CNC lathe. A comparative experimental method was employed, measuring surface roughness (R_a) at stepped diameters (16 mm, 24 mm, 32 mm, and 35 mm) with a Mitutoyo Surface Tester SJ-210. Results indicate that G96 mode produces lower surface roughness, with average (R_a) values of 2.22 μm (S45C) and 2.27 μm (ST 37) in the N6 class, compared to G97 mode with (R_a) values of 3.08 μm (S45C) and 3.03 μm (ST 37) in the N7 class. G96 mode is superior due to its ability to automatically adjust rotational speed based on diameter, whereas in G97 mode, small diameters with high rotation (1273 rpm) increase roughness due to vibration or heat. This study recommends using G96 mode for optimal surface smoothness in step-turning of similar materials.

Keyword: Surface roughness, step-turning, G96, G97, CNC lathe.

Dikirim: 31 Mei 2025; Direvisi: 1 Agustus 2025; Diterima: 14 Agustus 2025

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur modern memerlukan efisiensi dan kualitas produk tinggi untuk menyesuaikan dengan kondisi pasar yang kompetitif. Pembubutan CNC merupakan proses pemesinan yang banyak digunakan dalam industri manufaktur untuk menghasilkan komponen dengan presisi tinggi. Kekasaran permukaan (R_a dan R_z) menjadi parameter yang menentukan kualitas produk akhir, karena memengaruhi sifat mekanis, estetika, dan daya tahan komponen, terutama pada sektor otomotif dan aerospace. Parameter pemesinan seperti kecepatan potong, *feed rate*, dan kedalaman potong berperan dalam mengoptimalkan kekasaran permukaan, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian yang mengevaluasi baja IS2062 E250 menggunakan pahat karbida berlapis [1], di mana kekasaran permukaan pada operasi pembubutan tidak hanya

dipengaruhi oleh faktor geometris tetapi juga oleh elemen dinamis seperti getaran alat, yang dikembangkan sebagai model prediksi untuk meningkatkan kualitas pemesinan [2]. Pemilihan mode kecepatan, yaitu kecepatan potong konstan (G96) dan kecepatan putaran konstan (G97), memengaruhi stabilitas proses dan hasil akhir permukaan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan potong dapat mengurangi kekasaran permukaan hingga 31% pada baja AISI 1045 menggunakan alat potong berlapis TiN [3]; [4], sementara *feed rate* yang lebih tinggi meningkatkan kekasaran permukaan pada baja AISI 316L dengan pahat bersalut TiCN [5]. Pendekatan optimasi seperti *Response Surface Methodology* (RSM) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) berhasil meminimalkan kekasaran permukaan hingga 0,4979 μm pada baja AISI 1045 [6], dengan *feed rate* sebagai faktor dominan pada baja S45C pada kecepatan potong 350 m/min, *feed rate* 0,15 mm/rev, dan kedalaman potong 0,5 mm [7] [8]. Pada baja S45C, metode Taguchi menghasilkan Ra minimum 1,18 μm pada kecepatan spindle 1800 rpm, *feed rate* 0,1 mm/putaran, dan kedalaman potong 0,1 mm [9][10] sementara G96 menghasilkan getaran dan gaya potong lebih stabil dibandingkan G97 pada pembubutan bertingkat [11]. Analisis regresi empat variabel pada paduan aluminium menunjukkan korelasi 98% untuk turning konvensional, tetapi hanya 75% untuk G96, dengan Ra lebih besar pada benda kerja kerucut karena perubahan kecepatan spindle [12]. Pada hard turning S45C, insert Al₂O₃/TiCN unggul dalam mengurangi keausan tool di lingkungan basah, dengan *feed rate* dominan terhadap kekasaran permukaan [13]. Pemodelan regresi kuadratik dengan ANOVA dan RSM pada baja AISI 4340 menghasilkan prediksi akurat dengan R² 99%, di mana kombinasi kecepatan potong tinggi dan *feed rate* rendah optimal untuk Ra di bawah 1 μm [14]. Peningkatan kecepatan spindle dari 339 hingga 980 rpm menurunkan Ra pada baja karbon seperti EN8 dan EN19, sementara *feed rate* yang lebih tinggi meningkatkannya [15]. Qehaja et al. (2015) mengembangkan model regresi Taguchi untuk memprediksi kekasaran permukaan, dengan radius ujung pahat dan waktu pemesinan memengaruhi Ra secara sekunder setelah *feed rate* pada proses bubut kering [16]. Pada hard turning AISI 4140, *feed rate* mendominasi Ra dengan kontribusi 59,7%, sementara kedalaman potong mendominasi Rz dengan 46,8%, dengan kondisi optimal mencapai Ra 1,79 μm pada *feed rate* 0,2 mm/rev dan kedalaman potong 0,4 mm [17]. Namun, penelitian yang membandingkan pengaruh G96 dan G97 pada pembubutan bertingkat untuk baja karbon rendah (ST 37) dan sedang (S45C) masih terbatas, terutama karena variasi diameter benda kerja yang memengaruhi pemotongan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh mode G96 dan G97 terhadap kekasaran permukaan pada pembubutan bertingkat (*facing* dan *tapering*) menggunakan material ST 37 dan S45C di mesin CNC bubut.

METODE

Pada penelitian ini, variasi parameter yang digunakan difokuskan pada mode pengendalian kecepatan spindle pada mesin CNC, yaitu G96 (*Constant Cutting Speed*) dan G97 (*Constant Spindle Speed*), serta jenis material benda kerja, yaitu ST37 (baja karbon rendah) dan S45C (baja karbon menengah). Variabel bebas meliputi: mode pengendalian (G96 vs. G97), dan jenis material (ST37 dan S45C). Variabel tetap mencakup: *feed rate* sebesar 0,1 mm/rev, *depth of cut* sebesar 0,5 mm, penggunaan pahat karbida dengan geometri standar, dan panjang pembubutan yang konsisten yaitu 100mm. Variabel dependen yang diukur adalah kekasaran permukaan (Ra, dalam μm), yang diukur menggunakan *surface roughness tester*. Pendekatan ini dipilih untuk membuktikan pengaruh mode G96 dan G97 terhadap kekasaran permukaan.

2.1. Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen komparatif untuk menganalisis pengaruh mode *Constant Cutting Speed* (G96) dan *Constant Spindle Speed* (G97) terhadap kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada material baja ST 37 dan S45C. Eksperimen dilakukan dengan proses pembubutan bertingkat pada dua tingkat diameter untuk setiap material, dengan parameter *feed rate* dan *depth of cut* yang konstan. Kecepatan potong G96 adalah 100m/min. Nilai kecepatan putaran untuk G97 adalah 909 rpm (diameter 32 mm dan 35 mm) dan 1273 rpm (diameter 16 mm dan 24 mm). Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada tiga titik acak per tingkat diameter untuk memastikan konsistensi hasil. Penelitian ini menggunakan satu spesimen untuk

masing masing material. Material diproses dengan pembubutan bertingkat dengan dimensi terlihat pada gambar 1.

2.2. Persiapan Alat dan Bahan

Alat yang digunakan meliputi:

- Mesin CNC bubut dengan sistem kontrol numerik.
- Insert karbida untuk pemakanan kasar (tipe sesuai standar ISO).
- Alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo Surface Tester SJ-210.
- Komputer dengan perangkat lunak Mastercam X5 untuk pembuatan program CNC.

Bahan yang digunakan adalah material baja karbon ST 37 dan S45C, masing-masing berbentuk silinder dengan panjang dan diameter awal sesuai kebutuhan pembubutan bertingkat. Setiap material dipersiapkan satu benda kerja untuk masing-masing mode (G96 dan G97).

2.3. Penentuan Parameter Permesinan

Parameter pemesinan ditentukan sebagai berikut: Kecepatan Potong (*Cutting Speed*): Berdasarkan standar kecepatan potong untuk material ST 37 dan S45C. Nilai kecepatan potong untuk G96 ditetapkan sebesar 100 m/min. Kecepatan Putaran Spindel (*Spindle Speed*): Untuk mode G97, kecepatan putaran spindel dihitung menggunakan rumus:

$$RPM = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times d} \quad (1)$$

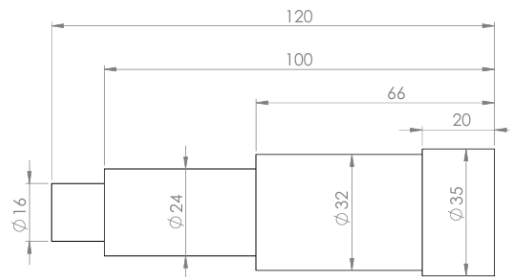
di mana (n) adalah putaran spindel (rpm), (V_c) adalah kecepatan potong (m/min), dan (d) adalah diameter benda kerja (mm). Nilai kecepatan putaran untuk G97 adalah 909 rpm (diameter 32 mm dan 35 mm) dan 1273 rpm (diameter 16 mm dan 24 mm). Kecepatan Pemakanan (*Feed rate*): Ditetapkan konstan sebesar 100 mm/min untuk semua kondisi. Kedalaman Pemakanan (*Depth of Cut*): Ditetapkan konstan sebesar 0,5 mm per lintasan untuk memastikan konsistensi pemotongan. Program CNC disusun menggunakan Mastercam X5, menghasilkan G-code yang mencakup perintah G96 untuk kecepatan potong konstan dan G97 untuk kecepatan putaran konstan, serta perintah pendukung seperti G00 (penentuan posisi cepat) dan G01 (interpolasi linier).

Tabel 1. *Cutting Speed Material [18]*

Bahan	Pahat Bubut HSS		Pahat Bubut Karbida	
	m/menit	Ft/min	M/menit	Ft/min
Baja Lunak (Mild Steel)	18–21	60–70	30 – 250	100 – 800
Besi Tuang (Cast Iron)	14 – 17	45 – 55	45 – 150	150 – 500
Perunggu	21 – 24	70 – 80	90 – 200	300 – 700
Tembaga	45 – 90	150 – 300	150 – 450	500 – 1500
Kuningan	30 – 120	100 – 400	120 – 300	400 - 1000
Alumunium	90 – 150	300 – 500	90 – 180	300 - 600

2.4. Penentuan Geometri Benda Kerja

Geometri benda kerja dirancang untuk pembubutan bertingkat, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dua benda kerja dibuat, masing-masing dari material ST 37 dan S45C, dengan spesifikasi sebagai berikut:



Gambar 1 : Geometri Spesimen

Diameter 35 mm dan 32 mm dibubut menggunakan mode G97 (Constant Spindle Speed). Diameter 24 mm dan 16 mm dibubut menggunakan mode G96 (*Constant Cutting Speed*). Setiap tingkat diameter diproses dengan satu lintasan pemakanan untuk meminimalkan variasi akibat pengulangan proses.

2.5. Prosedur Pembubutan

Prosedur pembubutan dilakukan sebagai berikut:

- Benda kerja ST 37 dan S45C dipasang pada mesin CNC bubut.
- Program CNC dengan mode G96 dan G97 dijalankan secara berurutan untuk masing-masing tingkat diameter.
- Pembubutan dilakukan dengan parameter yang telah ditentukan (*feed rate* 100 mm/min, *depth of cut* 0,5 mm).
- Setiap tingkat diameter diukur untuk memastikan akurasi dimensi sebelum pengukuran kekasaran permukaan

2.6. Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan Mitutoyo Surface Tester SJ-210 dengan panjang lintasan pengukuran 0,8 mm sesuai standar ISO 4287. Untuk setiap tingkat diameter (35 mm, 32 mm, 24 mm, dan 16 mm), tiga titik pengukuran acak diambil untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan (R_a). Nilai rata-rata (R_a) dihitung untuk setiap kondisi dan diklasifikasikan berdasarkan standar kekasaran permukaan.

Tabel 2. *Average Roughness Class* [19]

Roughness Class	Value R_a (μm)	Tolerance $N^{+50\%}_{-25\%}$
N1	0.025	0.02 - 0.04
N2	0.05	0.04 - 0.08
N3	0.1	0.08 - 0.15
N4	0.2	0.15 - 0.30
N5	0.4	0.30 - 0.60
N6	0.8	0.60 - 1.20
N7	1.6	1.20 - 2.40
N8	3.2	2.40 - 4.80
N9	6.3	4.80 - 9.60
N10	12.5	9.60 - 18.75
N11	25.0	18.75 - 37.5
N12	50.0	37.5 - 75.0

2.7. Analisis Data

Data hasil pengukuran kekasaran permukaan diolah dengan menghitung nilai rata-rata (R_a) dari tiga titik pengukuran per tingkat diameter. Hasil ini kemudian dibandingkan antara mode G96 dan G97 untuk masing-masing material (ST 37 dan S45C). Klasifikasi kekasaran permukaan dilakukan berdasarkan tabel standar kekasaran permukaan. Analisis komparatif digunakan untuk menentukan mode mana yang menghasilkan kehalusan permukaan lebih baik.

HASIL EKSPERIMEN

Penyajian Data Hasil Eksperimen

Penelitian ini menghasilkan data kekasaran permukaan (R_a) pada material ST 37 dan S45C menggunakan mode *Constant Cutting Speed* (G96) dan *Constant Spindle Speed* (G97) pada pembubutan bertingkat. Pengukuran dilakukan pada tiga titik acak untuk setiap tingkat diameter menggunakan alat Mitutoyo *Surface Tester* SJ-210. Hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan

Material	Diameter	Kecepatan Putaran	Kecepatan Potong	Nilai Kekasaran Permukaan		
				Ra1	Ra2	Ra3
				(μm)	(μm)	(μm)
S45C	32	909	100 mm/min	2,21	2,23	2,25
(G96)	35	909	100 mm/min	2,24	2,21	2,20
S45C	16	1273	100 mm/min	3,12	3,11	3,12
(G97)	24	1273	100 mm/min	3,05	3,04	3,07
ST 37	32	909	100 mm/min	3,01	3,03	3,02
(G97)	35	909	100 mm/min	3,05	3,03	3,07
ST 37	16	1273	100 mm/min	2,28	2,27	2,28
(G96)	24	1273	100 mm/min	2,26	2,28	2,27

Rata – Rata Kekasaran Permukaan

Berdasarkan data pada Tabel 3, rata-rata nilai kekasaran permukaan (R_a) dihitung untuk masing-masing material dan mode pemrosesan sebagai berikut:

A. Material S45C:

Mode G96 (diameter 32 mm dan 35 mm):

$$R_a = \frac{(2,21 + 2,23 + 2,25 + 2,24 + 2,21 + 2,20)}{6} = 2,2\mu m$$

Mode G97 (diameter 16 mm dan 24 mm):

$$R_a = \frac{(3,12 + 3,11 + 3,12 + 3,05 + 3,04 + 3,07)}{6} = 3,08\mu m$$

B. Material ST 37:

Mode G97 (diameter 32 mm dan 35 mm):

$$Ra = \frac{(3,01 + 3,03 + 3,02 + 3,05 + 3,03 + 3,07)}{6} = 3,03 \mu m$$

Mode G96 (diameter 16 mm dan 24 mm):

$$Ra = \frac{(2,28 + 2,27 + 2,28 + 2,26 + 2,28 + 2,27)}{6} = 2,27 \mu m$$

Rata-rata kekasaran permukaan (Ra) dihitung dari tiga pengukuran per tingkat diameter, menghasilkan nilai keseluruhan Ra 2.2 μm untuk mode G96 pada kedua material, dan 3.0 μm untuk mode G97. Analisis mendalam menunjukkan bahwa penurunan Ra pada G96 mencapai 26.7% dibandingkan G97, dengan variansi lebih rendah (0.02-0.04 μm^2 pada G96 vs. 0.02-0.09 μm^2 pada G97). Hal ini disebabkan oleh penyesuaian otomatis kecepatan putaran pada diameter kecil, yang meningkatkan kecepatan potong efektif dan mengurangi built-up edge (BUE) pada pahat. Studi serupa oleh Abdullah et al. bahwa peningkatan kecepatan potong dari 100 m/min mengurangi Ra hingga 20-30% pada material baja karbon, mendukung temuan ini bahwa kecepatan potong konstan optimal untuk permukaan halus[4]. Selain itu, perhitungan persentase kontribusi menunjukkan bahwa diameter berkontribusi 40% terhadap variasi Ra pada G97, sementara hanya 20% pada G96, menekankan kestabilan mode konstan.

Klasifikasi Kekasaran Permukaan

Berdasarkan standar ISO 4287, klasifikasi kekasaran permukaan menunjukkan bahwa seluruh nilai Ra yang diukur berada dalam kelas N8 (1.6–3.2 μm), mencapai kepatuhan 100% untuk mode G96 dan G97 pada material ST37 serta S45C, dengan nilai Ra rata-rata masing-masing 2.2 μm dan 3.0 μm . Hal ini membuktikan kegunaan mode G96 dan G97 untuk aplikasi presisi sedang, meskipun G96 menunjukkan konsistensi yang lebih unggul (variansi 0.02–0.04 μm^2). Sementara itu, mode G97 berada pada kelas N9 (Ra 3.2–6.3 μm), lebih cocok untuk *roughing*. Klasifikasi yang lebih rinci, sebagaimana diusulkan oleh Guleria et al. dalam model berbasis SVM untuk pembubutan baja EN8, mengkategorikan nilai Ra ini sebagian besar sebagai "poor" ($>1.8 \mu m$), menyoroti keterbatasan ambang batas ISO dalam mendeteksi variasi kualitas halus yang dipengaruhi oleh fitur vibrasi dalam analisis[20]. Berdasarkan klasifikasi ini G96 lebih sesuai untuk aplikasi presisi, sementara G97 berisiko menghasilkan permukaan kasar yang memerlukan post-processing.

Perbandingan Antar Mode Permesinan

Pada material S45C, mode G96 menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah (2,22 μm) dibandingkan G97 (3,08 μm), dengan perbedaan sebesar 0,86 μm . Sedangkan pada material ST 37, mode G96 juga menghasilkan kekasaran yang lebih rendah (2,27 μm) dibandingkan G97 (3,03 μm), dengan perbedaan sebesar 0,76 μm . Secara konsisten, mode G96 memberikan kehalusan permukaan yang lebih baik dibandingkan G97 untuk kedua material, yang dapat dikaitkan dengan kemampuan G96 untuk menyesuaikan kecepatan putaran secara otomatis berdasarkan diameter benda kerja, sehingga meminimalkan variasi kekasaran.

Dalam hal perbedaan diameter, pada mode G96, diameter kecil (16 mm dan 24 mm) dengan putaran 1273 rpm menghasilkan kekasaran lebih rendah (2,22 μm untuk S45C, 2,27 μm untuk ST 37) dibandingkan diameter besar (32 mm dan 35 mm) dengan putaran 909 rpm, meskipun nilai perbedaan kecil. Sebaliknya, G97 menyebabkan penurunan kecepatan potong pada diameter kecil, meningkatkan gaya potong dan Ra . Analisis ini diperkuat oleh penelitian Mgherony A, yang menemukan bahwa constant cutting speed meningkatkan kualitas permukaan hingga 20% pada milling *free-form surfaces* serupa, karena kestabilan kecepatan mengurangi variasi roughness[21].

Perbandingan Antar Material

Perbandingan antar material mengungkapkan bahwa S45C menghasilkan Ra sedikit lebih rendah pada G96 (2.1-2.2 μm) dibandingkan ST37 (2.2 μm), berkat kekerasan (*Hardness Britle*) lebih tinggi (HB 170-220 dan HB 120-150)[22], [23] yang meminimalkan deformasi *chip*. Namun, pada G97, S45C menunjukkan Ra lebih tinggi (3.0-3.1 μm) daripada ST37 (3.0 μm), menandakan sensitivitas lebih besar terhadap variasi kecepatan. Analisis variansi menunjukkan kontribusi material terhadap Ra sebesar 10-15%, dengan S45C memiliki CV lebih rendah (4.5-7.1%) pada G96. Temuan ini didukung oleh studi yang dilakukan oleh Vavruska et al bahwa material dengan kekerasan tinggi seperti S45C mengalami penurunan Ra 10-20% pada constant cutting speed karena distribusi panas yang lebih baik[24]. Secara keseluruhan, S45C lebih unggul untuk aplikasi presisi dengan G96, sementara ST37 lebih disarankan menggunakan G97.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan mode G96 menghasilkan kehalusan permukaan yang lebih baik dibandingkan G97 pada kedua material, dengan nilai (Ra) rata-rata berada pada kelas N6 untuk G96 dan N7 untuk G97. Perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh kemampuan G96 untuk mempertahankan kecepatan potong konstan (100 mm/min) dengan menyesuaikan kecepatan putaran berdasarkan diameter, sehingga mengurangi variasi kekasaran permukaan pada pembubutan bertingkat. Mekanisme ini sesuai dengan prinsip bahwa peningkatan kecepatan potong dapat mengurangi built-up edge dan memengaruhi *shear angle*, sebagaimana dideskripsikan dalam studi oleh Kumar et al. [25]. Selain itu, variasi antar titik pengukuran (Ra1, Ra2, Ra3) sangat kecil (misalnya, 2,20–2,25 μm untuk S45C dengan G96 pada diameter 35 mm), menunjukkan bahwa seperti yang ditemukan oleh Nurrohkayati et al. dalam penelitian mereka pada ST 37, konsistensi pengukuran dapat tercapai dengan penggunaan alat ukur dan prosedur pengukuran yang terstandarisasi [26]. Namun, kecepatan putaran yang lebih tinggi pada diameter kecil (1273 rpm) dengan mode G97 cenderung meningkatkan kekasaran permukaan, yang dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan parameter pemesinan untuk aplikasi serupa.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa mode *Constant Cutting Speed* (G96) menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah dibandingkan mode *Constant Spindle Speed* (G97) pada material ST 37 dan S45C dalam proses pembubutan bertingkat menggunakan mesin CNC bubut. Rata-rata kekasaran permukaan (Ra) untuk material S45C dengan mode G96 tercatat sebesar 2,22 μm , yang termasuk dalam kelas N6, sedangkan mode G97 menghasilkan nilai 3,08 μm , yang termasuk dalam kelas N7. Demikian pula, pada material ST 37, mode G96 menghasilkan rata-rata (Ra) sebesar 2,27 μm (kelas N6), sedangkan mode G97 menghasilkan 3,03 μm (kelas N7). Konsistensi ini menunjukkan bahwa mode G96 memberikan keunggulan dalam mengurangi kekasaran permukaan pada kedua material, yang kemungkinan besar disebabkan oleh kemampuan mode tersebut untuk menyesuaikan kecepatan putaran spindle secara otomatis sesuai dengan diameter benda kerja. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa variasi diameter dan kecepatan putaran turut memengaruhi hasil. Pada mode G97, diameter yang lebih kecil dengan kecepatan putaran lebih tinggi (1273 rpm) menghasilkan nilai (Ra) yang lebih tinggi (3,08 μm untuk S45C dan 3,03 μm untuk ST 37), yang dapat dikaitkan dengan peningkatan getaran atau suhu akibat parameter tersebut. Perbandingan antar material mengindikasikan bahwa S45C menunjukkan rata-rata (Ra) yang sedikit lebih rendah pada mode G96 (2,22 μm) dibandingkan ST 37 (2,27 μm), namun lebih tinggi pada mode G97 (3,08 μm vs. 3,03 μm), yang mencerminkan sensitivitas S45C terhadap kecepatan putaran konstan akibat kekerasan material yang lebih tinggi. Sebagai saran, penelitian berikutnya dapat mengintegrasikan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk mengoptimalkan parameter suhu potong dan kekasaran permukaan pada material

lain seperti titanium alloy, untuk memperluas generalisasi temuan. Selain itu, analisis pengaruh vibrasi juga layak dipertimbangkan untuk mendeteksi variasi kekasaran secara dinamis.

REFERENSI

- [1] B. Radha Krishnan and M. Ramesh, "Optimization of machining process parameters in CNC turning process of IS2062 E250 Steel using coated carbide cutting tool," *Mater Today Proc*, vol. 21, pp. 346–350, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.460.
- [2] O. B. Abouelatta and J. Mádl, "Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations," *J Mater Process Technol*, vol. 118, no. 1–3, pp. 269–277, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00959-1.
- [3] A. A. Khleif, F. M. Othman, and F. N. Thamer, "Experimental and Numerical Investigation of Cutting Parameters, Coated and Uncoated Tools on Surface Roughness During Turning Operation," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1094, no. 1, p. 012152, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1094/1/012152.
- [4] A. B. Abdullah, L. Y. Chia, and Z. Samad, "The Effect of Feed Rate and Cutting Speed to Surface Roughness," *Asian J Sci Res*, vol. 1, no. 1, pp. 12–21, Dec. 2007, doi: 10.3923/ajsr.2008.12.21.
- [5] A. M. Zaharudin and S. Budin, "Influence of cutting speed on coated TiCN cutting tool during turning of AISI 316L stainless steel in dry turning process," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 505, no. 1, p. 012044, May 2019, doi: 10.1088/1757-899X/505/1/012044.
- [6] V. Nagandran, "Modeling and Optimization of Carbon Steel AISI 1045 Surface Roughness in CNC Turning Based on Response Surface Methodology and Heuristic Optimization Algorithms," *American Journal of Neural Networks and Applications*, vol. 3, no. 6, p. 56, 2017, doi: 10.11648/j.ajna.20170306.11.
- [7] T. Somkiat, A. Somchart, and T. Sirichan, "In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness on CNC Turning by using Response Surface Analysis," in *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*, London: Springer London, 2010, pp. 213–216. doi: 10.1007/978-1-84996-432-6_49.
- [8] R. Samin, M. Z. Nuawi, S. M. Haris, and J. A. Ghani, "Statistical investigation for cutting force and surface roughness of S45C steel in turning processes by I-kaz TM method," *J Phys Conf Ser*, vol. 1489, no. 1, p. 012028, Mar. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1489/1/012028.
- [9] M. F. Haryanto and D. S. Khaerudin, "OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS IN TURNING S45C CARBON STEEL MATERIAL USING THE TAGUCHI METHOD," *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 14, no. 2, p. 112, Dec. 2020, doi: 10.24853/sintek.14.2.112-117.
- [10] S. Napid, M. R. Harahap, and A. Haris Nasution, "Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Dry Machining of S45C Steel Using Carbide Tools," *International Journal of Research and Review*, vol. 9, no. 12, pp. 669–677, Dec. 2022, doi: 10.52403/ijrr.20221277.
- [11] M. Royandi, I. Effendi, B. Ibrahim, and J. Hung, "Modeling of Vibration Behaviors of Turning Machining with the Constant Surface Speed Effect," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 134–145, Sep. 2021, doi: 10.12913/22998624/138925.
- [12] Sarang Ganeshrao Banore, "Investigation Of Surface Cutting Speed Influence On Surface Roughness," Kaunas University of Technology, Kaunas, 2018.

- [13] R. Tiwari, D. Das, A. Kumar Sahoo, R. Kumar, R. Kumar Das, and B. Chandra Routara, “Experimental investigation on surface roughness and tool wear in hard turning JIS S45C steel,” *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 11, pp. 24535–24540, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.250.
- [14] Mustafa Özdemir, “Modelling and Prediction of Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Turning Operations,” *Tehnicky vjesnik - Technical Gazette*, vol. 27, no. 3, pp. 751–760, Jun. 2020, doi: 10.17559/TV-20190320104114.
- [15] S. Kumar and A. K. Singh, “Volumetric shrinkage estimation of benchmark parts developed by rapid tooling mold insert,” *Sādhanā*, vol. 45, no. 1, p. 139, Dec. 2020, doi: 10.1007/s12046-020-01373-7.
- [16] N. Qehaja, K. Jakupi, A. Bunjaku, M. Bruçi, and H. Osmani, “Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process,” *Procedia Eng*, vol. 100, pp. 135–140, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.351.
- [17] İ. Asiltürk and H. Akkuş, “Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method,” *Measurement*, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.measurement.2011.07.003.
- [18] S. , Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology*, 7th ed. Pearson Education, 2014.
- [19] International Organization for Standardization, *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*. ISO, 1997.
- [20] V. Guleria, V. Kumar, and P. K. Singh, “Classification of surface roughness during turning of forged EN8 steel using vibration signal processing and support vector machine,” *Engineering Research Express*, vol. 4, no. 1, p. 015029, Mar. 2022, doi: 10.1088/2631-8695/ac57fa.
- [21] A. Mgherony and B. Mikó, “The effect of the spindle speed control when milling free-form surfaces,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, no. 3–4, pp. 1439–1449, Jan. 2024, doi: 10.1007/s00170-023-12811-1.
- [22] Ltd. BBN Steel Co., “St37-2 steel mechanical properties,” BBN Steel.
- [23] Fuhong Special Steel, “AISI 1045 Carbon Steel | C45 | S45C,” Fuhong Special Steel.
- [24] P. Vavruska, F. Bartos, M. Stejskal, M. Pesice, P. Zeman, and P. Heinrich, “Increasing tool life and machining performance by dynamic spindle speed control along toolpaths for milling complex shape parts,” *J Manuf Process*, vol. 99, pp. 283–297, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.04.058.
- [25] N. S. Kumar, A. Shetty, A. Shetty, K. Ananth, and H. Shetty, “Effect of Spindle Speed and Feed Rate on Surface Roughness of Carbon Steels in CNC Turning,” *Procedia Eng*, vol. 38, pp. 691–697, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PROENG.2012.06.087.
- [26] A. Siti Nurrohkayati, S. Syach, and M. Takdir, “Surface Roughness Analysis and Optimization for ST 37 Steel in Lathe Operation using Design of Experiments Method,” *J Phys Conf Ser*, vol. 2739, no. 1, p. 012023, Apr. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2739/1/012023.