



Pengaruh Kecepatan Putaran *Spindle* dan *Feed Rate* terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan Material AISI 4140 pada Proses Bubut

Sanwily¹ Yano Hurung Anoi², Rosmiati³, Siti Norhidayah⁴

^{1,2,3}Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang

⁴Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Balikpapan

Email: ¹sanwily@gmail.com, ²yanodayak@yahoo.com, ³hanafi.rosmiati@gmail.com, ⁴norhidayah@uniba-bpn.ac.id

Abstract

Spindle speed and feed rate are factors that significantly influence the turning process in the manufacturing industry. One of the main indicators of turning quality is surface roughness, as it affects the service life, performance, and reliability of machine components. In machining workshop practice, particularly in the turning of AISI 4140 alloy steel, inconsistent surface quality often occurs due to the determination of cutting parameters that still depend on operator experience and have not been technically standardized. This study aims to analyze the effect of variations in spindle speed and feed rate on the surface roughness of AISI 4140 material in conventional turning processes and to determine the combination of cutting parameters that produce the most optimal surface roughness value. The research method used is a quantitative method with an experimental approach. The turning process was carried out using a TOS TRENCIN SN 71 C lathe with spindle rotation speed variations of 250 RPM, 360 RPM, and 500 RPM, and feed rate variations of 0.09 mm/rev, 0.16 mm/rev, and 0.23 mm/rev. Other cutting parameters were kept constant, namely a cutting depth of 0.5 mm and the use of Sandvik Coromant carbide insert chisels. Surface roughness measurements were carried out using a TIME 3200 surface roughness tester with Ra parameters. ANOVA analysis showed that feed rate was the most dominant parameter affecting surface roughness (p-value $0.02 < 0.05$). The best average surface roughness value obtained was 0.945 μm with a roughness class of N6 using a spindle speed of 500 RPM and a feed rate of 0.09 mm/rev.

Keywords: Turning, AISI 4140, Spindle Speed, Feed Rate, Surface Roughness.

Abstrak

Kecepatan spindle dan feed rate merupakan hal yang sangat berpengaruh pada proses pembubutan dalam industri manufaktur. Salah satu indikator utama kualitas hasil pembubutan adalah kekasaran permukaan, karena berpengaruh terhadap umur pakai, performa, dan keandalan komponen mesin. Pada praktik bengkel permesinan, khususnya pada pembubutan material baja paduan AISI 4140, sering terjadi ketidak konsistenan kualitas permukaan akibat penentuan parameter pemotongan yang masih bergantung pada pengalaman operator dan belum terstandar secara teknis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan putaran spindle dan feed rate terhadap tingkat kekasaran permukaan material AISI 4140 pada proses bubut konvensional, serta menentukan kombinasi parameter pemotongan yang menghasilkan nilai kekasaran permukaan paling optimal. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimental. Proses pembubutan dilakukan menggunakan mesin bubut TOS TRENCIN SN 71 C dengan variasi kecepatan putaran spindle 250 RPM, 360 RPM, dan 500 RPM, serta variasi feed rate 0,09 mm/rev, 0,16 mm/rev, dan 0,23 mm/rev. Parameter pemotongan lainnya dijaga konstan, yaitu kedalaman pemotongan 0,5 mm dan penggunaan pahat insert carbide Sandvik Coromant. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan surface roughness tester TIME 3200 dengan parameter Ra. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa feed rate merupakan parameter yang paling dominan mempengaruhi kekasaran permukaan (p-value $0,02 < 0,05$). Nilai rata – rata kekasaran permukaan terbaik yang diperoleh adalah 0,945 μm dengan kelas kekasaran N6 dengan penggunaan parameter kecepatan spindle 500 RPM dan kecepatan feed rate 0,09 mm/rev.

Kata kunci: Pembubutan, AISI 4140, Kecepatan Spindle, Feed Rate, Kekasaran Permukaan.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi permesinan, khususnya mesin bubut konvensional, telah mengalami kemajuan yang signifikan di seluruh dunia. Sebagai salah satu produsen pupuk terbesar di Indonesia, PT Pupuk Kaltim harus selalu memastikan keandalan dan kinerja peralatan pabriknya. Sebagian besar peralatan produksi, seperti pompa, kompresor, turbin, dan sistem perpipaan, terdiri dari komponen yang bekerja di bawah tekanan, beban dinamis, dan kondisi korosif. Kualitas pembuatan dan perawatan komponen ini sangat penting, dan kualitas permukaan yang dihasilkan selama proses permesinan merupakan salah satu faktor yang menentukan keandalan komponen tersebut.

Permasalahan yang sering muncul di bengkel bubut SBU JPP yang membantu pabrik PT. Pupuk Kalimantan Timur dalam mengoptimalkan nilai perusahaan dengan menjual jasa dan produk yang telah dibuat oleh karyawannya. Salah satunya adalah variasi kualitas permukaan yang dihasilkan, yang sebagian besar bersumber dari ketiadaan standar parameter pemotongan yang terukur. Selama ini, penetapan kecepatan putaran *spindle* (*spindle speed*) dan kecepatan pemakanan (*feed rate*) masih mengandalkan pengalaman individu operator tanpa pedoman teknis yang terstruktur. Akibatnya, sering dijumpai ketidak konsisten hasil, yang berujung pada komponen yang harus dikerjakan ulang, peningkatan biaya akibat keausan pahat yang tidak terkontrol, dan risiko kegagalan komponen di lapangan akibat konsentrasi tegangan pada permukaan yang kasar.

Mesin bubut konvensional menjadi salah satu alat utama dalam proses manufaktur, terutama dalam mesin otomotif dan bidang industri. Mesin bubut konvensional tidak hanya digunakan untuk memproduksi komponen dengan bentuk silinder, tetapi juga dapat digunakan untuk berbagai bentuk geometris yang kompleks. Mesin bubut konvensional terdiri dari beberapa komponen utama, seperti *spindle*, *bed*, *carriage*, dan *tailstock*. Masing-masing dari komponen ini memiliki peran khusus dalam proses pemesinan. Parameter pemotongan, termasuk kecepatan pemakanan, kedalaman pemotongan, dan kecepatan putar, sangat memengaruhi keberhasilan proses pembubutan karena mempengaruhi gaya potong dan hasil akhir permukaan benda kerja. (Faturrahman, 2024). Kecepatan putar adalah salah satu faktor yang paling penting dalam proses pembubutan.

Kekasaran permukaan material yang dibuat dapat dipengaruhi oleh variasi kecepatan putar. Mesin bubut konvensional masih banyak digunakan dalam industri kecil dan menengah karena keunggulannya dalam hal biaya dan kemudahan pengoperasian (Abdilah & Sinurat, 2024).

Proses pembubutan adalah proses pemesinan konvensional untuk membentuk permukaan yang dilakukan dengan pahat terhadap benda kerja yang berputar. Proses ini dimaksudkan untuk menyayat bagian material dari bagian yang tidak diinginkan untuk memenuhi dimensi, toleransi, dan hasil akhir yang sesuai dengan desain teknik (Burrahman et al., 2024). Mesin bubut bekerja dengan memutar benda kerja pada sumbu putar. Pada saat yang sama, pahat potong bergerak sejajar atau melintang terhadap benda kerja (Rosandi et al., 2021). Penghilangan bagian benda kerja untuk memperoleh bentuk tertentu adalah prinsip kerja proses bubut, yang juga dikenal sebagai proses putar. Dalam situasi ini, pahat digerakkan secara translasi sejajar dengan sumbu putar benda kerja sehingga benda kerja dapat diputar atau dirotasi dengan kecepatan tertentu sepanjang proses pemakanan. Gerakan putar benda kerja ini dikenal sebagai gerak potong relatif dan gerak translasi (Siregar & Yunus, 2020). Menurut (B.S.Widodo et al., 2023), kecepatan potong yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pahat aus lebih cepat dan mengurangi kualitas hasil akhir, sementara kecepatan potong yang terlalu rendah dapat meningkatkan kekasaran permukaan. Penyayatan dapat dilakukan pada sisi kiri atau kanan, menghasilkan benda kerja berbentuk silinder, atau secara melintang, menghasilkan bentuk alur, potongan, atau permukaan (*facing*). Penyayatan dapat juga diarahkan miring, menghasilkan benda kerja berbentuk konis atau tirus dengan memutar eretan atas. Alur yang teratur seperti membubut ulir dapat dihasilkan oleh penyayatan beralur dengan kecepatan dan putaran tertentu. Penyayatan dapat dilakukan dari luar atau dari dalam. Penyayatan dari luar disebut membubut luar (*outside turning*). Penyayatan dari dalam disebut membubut dalam (*inside turning*) (Wicaksono et al., 2024). Selain itu, perubahan kecepatan potong dapat menyebabkan perubahan kekasaran permukaan, yang dapat menyebabkan produk yang kurang berkualitas dan efisiensi produksi. Akibatnya, penelitian tambahan diperlukan untuk menentukan pengaruh kecepatan potong terhadap kekasaran material AISI 4140.

Untuk meningkatkan efisiensi pemotongan dan mengurangi gaya potong, bahan ini dirancang dengan geometri yang ideal. Studi oleh (Manta et al., 2023) menemukan bahwa menggunakan pahat *insert* karbida dapat mengurangi kekasaran permukaan yang dihasilkan selama proses pembubutan karena pahat dapat mempertahankan ketajaman dan mengurangi getaran selama proses pemotongan. Umur alat potong dan biaya produksi dapat dipengaruhi oleh penggunaan pahat *insert* yang tepat. Studi oleh (Mu'arif et al., 2024) menemukan bahwa memilih pahat yang sesuai dengan kondisi pemotongan dapat meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi frekuensi penggantian pahat. Pahat *insert Sandvik Coromant* model TCMT 16 T3 04-MM 2025 sangat disukai di pasar, terutama jika digunakan untuk pemesian baja paduan seperti AISI 4140

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa kekasaran permukaan material sangat dipengaruhi oleh variasi kecepatan potong. (Lubis et al., 2021) menemukan bahwa meskipun kecepatan potong dapat mengurangi kekasaran permukaan, itu juga dapat meningkatkan keausan pada mata pahat. Selain itu, studi oleh (Halim, 2021) menunjukkan bahwa hasil akhir permukaan yang dihasilkan dapat dipengaruhi oleh kombinasi putaran *spindle* dan kedalaman potong. Berdasarkan uraian permasalahan di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dan mengetahui pengaruh variasi gerak pemakanan (*feed rate*) terhadap nilai kekasaran permukaan material AISI 4140 hasil pembubutan serta menentukan kombinasi parameter kecepatan potong dan gerak pemakanan yang menghasilkan nilai kekasaran permukaan paling optimal pada material AISI 4140.

Penelitian ini penting untuk dilakukan karena hasilnya diharapkan dapat menjadi acuan empiris dan panduan operasional yang praktis bagi industri, khususnya di lingkungan SBU JPP Pupuk Kalimantan dan bengkel-bengkel permesinan serupa, dalam menentukan kombinasi parameter pemotongan yang optimal untuk material AISI 4140. Dengan demikian, diharapkan dapat dicapai efisiensi biaya produksi, peningkatan kualitas produk berupa nilai kekasaran permukaan yang sesuai standar, dan umur pakai pahat yang lebih panjang, sehingga pada akhirnya dapat meningkatkan nilai ekonomis dan daya saing produk komponen mesin.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan *spindle* dan *feed rate* terhadap kekasaran permukaan material AISI 4140 hasil pembubutan. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap spesimen yang dibubut dengan variasi kecepatan *spindle* dan *feed rate* yang berbeda. Menurut Rosandi et al (2021), eksperimen yang dilakukan dengan variasi parameter pemotongan dapat memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai hubungan antara parameter tersebut dengan hasil akhir dari proses pembubutan. Selain itu, pendekatan ini juga memungkinkan peneliti untuk mengontrol variabel lain yang mungkin mempengaruhi hasil, seperti kedalaman potong dan jenis alat potong yang digunakan.

Penelitian eksperimental ini dilaksanakan di bengkel kerja SBU JPP Pupuk Kalimantan Timur, yang memungkinkan eksplorasi langsung dalam lingkungan industri yang relevan. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja AISI 4140 berbentuk batang silinder (*round bar*) kemudian material dipotong dengan dimensi panjang 110 mm dan diameter 31 mm. Baja AISI 4140 adalah baja karbon sedang dengan kandungan karbon sekitar 0,42%. Ini juga merupakan baja paduan rendah dengan unsur paduan krom dan molibdenum sebagai penguat. Sebagaimana ditunjukkan oleh *American Iron and Steel Institute* (AISI), yang merupakan salah satu standar untuk baja, dua angka pertama pada 4140 menunjukkan paduan *kromium-molibdenum* dan dua angka terakhir menunjukkan persentase kandungan karbon. Baja AISI 4140, menurut Sertifikasi *Mill SeAH Besteel Corp*, memiliki kekerasan maksimal 50-52 HRC setelah perlakuan panas (Neno, 2023). Baja AISI 4140 adalah jenis baja paduan yang dikenal karena kekuatan dan ketahanannya terhadap deformasi. Baja ini mengandung karbon (0,38-0,43%) dan paduan kromium (0,8-1,1%) serta molibdenum (0,15-0,25%), yang memberikan sifat mekanik yang unggul. Baja AISI 4140 banyak digunakan dalam aplikasi yang memerlukan ketahanan terhadap keausan dan kekuatan tinggi, seperti pada komponen mesin dan alat berat (Mahardika, 2020).

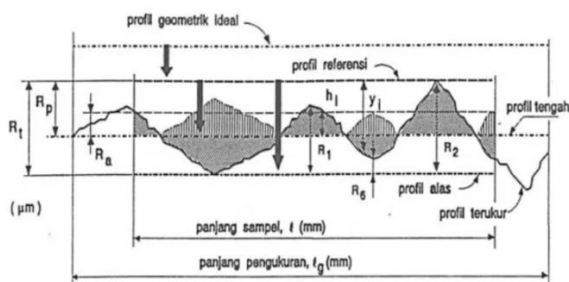
Sifat mekanik dari baja AISI 4140 dapat ditingkatkan melalui proses perlakuan panas, seperti *quenching* dan *tempering*. Proses ini akan mempengaruhi struktur mikro dan kekerasan material, yang pada gilirannya akan berdampak

pada hasil pemesinan (Novianto, 2024). Material baja AISI 4140 yang melewati proses *hot rolling* memiliki lapisan oksida permukaan yang disebut *mill scale*. Lapisan ini bersifat keras dan tidak rata sehingga harus dibuang terlebih dahulu untuk mendapatkan permukaan awal yang memiliki sifat/karakteristik yang sama di seluruh bagian. Gambar material baja AISI 4140 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Baja AISI 4140

Salah satu faktor penting dalam proses pemesinan yang memengaruhi kualitas produk akhir adalah kekasaran permukaan. Di lapangan, tidak mungkin mendapatkan hasil pembubutan yang sangat halus atau sempurna karena banyak faktor, termasuk faktor manusia (operator), getaran mesin yang digunakan, dan umur mesin. Akan tetapi, seiring dengan kemajuan dalam ilmu pengetahuan dan teknologi, para ilmuwan teknik mesin terus berusaha untuk membuat mesin bubut dan perlengkapannya yang mampu menghasilkan komponen dengan permukaan yang semakin halus dari sebelumnya. Ini akan memenuhi standar metrologi yang ditetapkan oleh para ahli pengukuran (Hamdani et al., 2020). Harga kekasaran rata-rata aritmatik (R_a), yang didefinisikan sebagai standar kualitas permukaan dari hasil pemotongan maksimum yang diizinkan, adalah proses pemesinan kualitas kekasaran permukaan yang paling umum. Di mana posisi R_a , bentuk profil, panjang sampel, dan panjang pengukuran diukur oleh mesin ukur kekasaran (Salikin et al., 2022). Gambar 2. menunjukkan profil permukaan kekasaran.



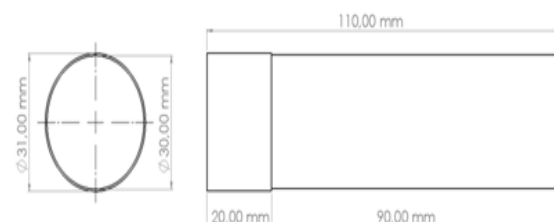
Gambar 2. Profil Permukaan Kekasaran
Tabel 1. Komposisi material AISI 4140
Sumber : Mahardika (2020)

Unsur	Komposisi %
Carbon (C)	0.38 - 0.43 %
Manganese (Mn)	0.75 - 1.00 %
Silicon (Si)	0.20 - 0.35 %
Chromium (Cr)	0.80 – 1.10 %
Molybdenum (Mo)	0.15 - 0.25 %
Phosphorus (P)	≤ 0.035 %
Sulfur (S)	≤ 0.04 %

Parameter permukaan yang berkaitan dengan dimensi baik pada arah tegak maupun melintang dapat didefinisikan berikut:

- 1) Kekasaran total R_t (μm) adalah jarak antara profil referensi dengan profil alas.
- 2) Kekasaran perataan R_p (μm) adalah jarak rata-rata profil referensi dengan profil terukur.
- 3) Kekasaran rata-rata aritmatik R_a (μm) adalah harga rata-rata aritmatik dari harga absolut jarak antara profil terukur dengan profil tengah.
- 4) Kekasaran rata-rata kuadrat R_q (μm) adalah akar dari jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.
- 5) Kekasaran total rata-rata R_z (μm), merupakan jarak antara profil alas ke profil terukur pada lima puncak tertinggi dikurangi jarak rata-rata profil terukur pada lima lembah terendah.

Nilai kekasaran rata-rata permukaan aritmatik ditunjukkan oleh simbol kekasaran permukaan. Nilai penyimpangan rata-rata aritmatik telah dikategorikan menjadi dua belas tingkat kekasaran oleh ISO. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2., tingkat kekasaran ini diwakili oleh N1 hingga N12.



Gambar 3. Desain Spesimen Penelitian
Tabel 2. Standarisasi Simbol Nilai Kekasaran

Tingkat Kekasaran	Kekasaran Ra (μm)	Toleransi (+50% & - 25%) (μm)	Panjang sampel (mm)
N12	50	37,5 - 75,0	8
N11	25	18,5 - 37,5	
N10	12.5	9,6 - 18,75	2,5
N9	6.3	4,8 - 9,6	
N8	3.2	2,4 - 4,8	0,8
N7	1.6	1,2 - 2,4	
N6	0.8	0,6 - 1,2	
N5	0.4	0,3 - 0,6	0,25
N4	0.2	0,15 - 0,3	
N3	0.1	0,08 - 0,15	
N2	0.05	0,04 - 0,08	0,08
N1	0.025	0,02 - 0,04	

Sumber : Ibnu Salikin (2022)

Pada Gambar 3. merupakan bahan spesimen penelitian yang telah didesain dengan dimensi panjang 110 mm dan diameter 31 mm. Terdapat 9 kombinasi percobaan dengan Kombinasi eksperimen sebagai variabel bebas yaitu variasi RPM *Spindle*: 250, 360, 500 RPM dan variasi Feed Rate: 0,09; 0,16; 0,23 mm/rev. Setiap kombinasi parameter kecepatan *spindle* dan *feed rate* akan menghasilkan satu spesimen uji, sehingga terdapat 9 spesimen (A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3). Sedangkan variabel tetap yaitu pada kedalaman potong (*depth of cut*) sebesar 0,5 mm., semua kombinasi eksperimen sama-sama dibubut menggunakan jenis pahat Insert *Carbide Sandvik Coromant* dengan model TCMT 16 T3 04-MM 2025 berbentuk segitiga dengan sudut inklusi 60° yang dipasang pada mesin bubut TOS TRENCIN SN 71 C dan tanpa cairan pendingin.

Secara umum, tahapan yang dilakukan pada proses penelitian adalah sebagai berikut:

a. Persiapan spesimen

Material AISI 4140 dipotong sesuai panjang, kemudian diberi kode A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, sampai C3 sesuai rancangan percobaan. Setiap spesimen dicekam pada *chuck* mesin bubut dan dilakukan *facing* untuk merapikan permukaan muka.

b. Proses pembubutan.

Mesin diatur pada kombinasi putaran *spindle* dan *feed rate* sesuai matriks percobaan (250/360/500 RPM dan 0,09/0,16/0,23 mm/rev). Pembubutan dilakukan sepanjang 90 mm dengan kedalaman potong 0,5 mm dalam kondisi kering (tanpa *coolant*). Beberapa parameter, termasuk kecepatan pemakanan, kedalaman pemakanan, dan kecepatan putar, memengaruhi gaya potong

proses pembubutan. Operator langsung di mesin bubut memiliki kemampuan untuk mengatur ketiga parameter tersebut. Baik sumbu utama maupun *spindle* dan benda kerja selalu dikaitkan dengan kecepatan putar, *n*. Kecepatan putar ditunjukkan dalam bentuk putaran per menit (RPM/Rotasi Per Menit). Berikut adalah penjelasan dan rumus menurut (Ratnawati et al., 2024)

1) Kedalaman Pemotongan.

Kedalaman Potong, juga dikenal sebagai *Depth of Cut*, diukur dalam arah radial terhadap benda kerja yang berputar dan merupakan besarnya material yang disayat oleh pahat dalam satu kali pemotongan. Salah satu dari tiga parameter utama proses bubut adalah kedalaman potong, bersama dengan kecepatan potong dan gerak makan.

$$a = \frac{D-d}{2} \text{ mm} \quad (1)$$

dengan : a = kedalaman pemotongan (mm)

D = diameter awal benda (mm)

d = diameter akhir benda kerja (mm)

2) Kecepatan Pemakanan

Kecepatan Pemakanan, juga dikenal sebagai *Feed Rate*, adalah kecepatan gerakan linier pahat sepanjang benda kerja dalam satuan milimeter per putaran (millimeter per putaran) atau milimeter per menit (millimeter per menit). Parameter ini menunjukkan seberapa jauh pahat bergerak maju selama satu putaran penuh benda kerja.

$$F = f \times n \quad (2)$$

dengan : F = Kecepatan makan (mm/min)

f = Gerak Pemakanan (mm/rev)

n = kecepatan putar *spindle* (RPM)

3) Waktu pemotongan.

Waktu pemotongan adalah jumlah waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proses pemesinan dari awal hingga akhir proses. Dalam hal pembubutan, ini adalah waktu ketika pahat bersentuhan dengan benda kerja dan mengeluarkan material.

$$tc = \frac{lt}{F} \quad (3)$$

dengan: tc = Waktu pemotongan (menit)

lt = Jarak Pemakanan (mm)

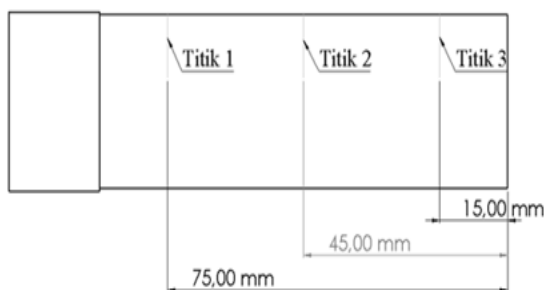
F = Kecepatan makan (mm/min)

c. proses pengukuran

Selanjutnya dilakukan pengukuran langsung (*direct measurement*) digunakan untuk mengumpulkan data dengan mengamati dan mengukur nilai variabel penelitian dengan alat ukur yang sesuai. Tujuannya adalah mendapatkan data yang tidak bias, akurat, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah tanpa menggunakan proses perantara atau estimasi. Instrumen pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini meliputi beberapa alat, antara lain:

- 1) *Surface Roughness Tester* TIMR 3200, digunakan untuk mengukur nilai kekasaran permukaan (Ra) hasil pembubutan dengan satuan mikrometer (μm).
- 2) *Tachometer*, digunakan untuk memastikan kecepatan putaran *spindle* mesin sesuai dengan nilai yang diatur (250, 300, dan 600 RPM).
- 3) *Micrometer* dan *Vernier Caliper*, digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja serta memastikan kedalaman potong yang diinginkan.
- 4) *Stopwatch*, digunakan untuk mencatat waktu pemotongan agar perhitungan parameter pemesinan lebih tepat.

Proses pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan *Surface Roughness Tester* TIME 3200 pada setiap spesimen dilakukan 3 kali pengukuran kekasaran permukaan yaitu titik 1 pada jarak 75 mm dari ujung benda, titik 2 pada jarak 45 mm dari ujung benda, titik 3 pada jarak 15 mm dari ujung benda dan diambil nilai rata-rata Ra (μm).



Gambar 4. Titik Pengukuran

Setelah data terkumpul, analisis dilakukan dengan menggunakan metode-metode berikut:

1) Analisis Statistik Deskriptif

Analisis Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan data hasil pengukuran tanpa melakukan pengujian hipotesis. Bertujuan untuk memberikan gambaran umum data yang diperoleh, yaitu:

a. Menghitung nilai rata-rata kekasaran permukaan pada tiap variasi RPM dan variasi *feed rate*..

b. Menyajikan data dalam bentuk tabel atau grafik sehingga mudah dibandingkan antar-variabel.

2) Analisis Grafik

1) Diagram Main *Effects Plot*: Untuk melihat pengaruh dari masing-masing faktor (RPM dan *feed rate*) terhadap kekasaran permukaan.

2) Diagram *Interaction Plot*: Untuk melihat apakah ada interaksi antara kedua faktor tersebut.

3) Analisis Variansi (ANOVA)

Dilakukan untuk menguji signifikansi pengaruh setiap variabel bebas dan interaksinya terhadap variabel terikat. Hasil ANOVA (nilai F dan p-value) akan menunjukkan parameter mana yang pengaruhnya paling signifikan secara statistik.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil pengukuran kekasaran permukaan untuk 9 kombinasi parameter pemesinan didapatkan dengan melakukan uji kekasaran permukaan benda dengan menggunakan alat ukur uji kekasaran *Surface Roughness Tester* TIME 3200 disajikan pada Tabel 3. Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan.

No.	Kode Sampel	Kecepatan Spindle n (RPM)	Feed Rate f (mm/rev)	Titik Ra1 (μm)	Titik Ra2 (μm)	Titik Ra3 (μm)	Nilai kekasaran rata-rata (Ra)
1.	A1	250	0,09	3,442	3,637	3,686	3,588
2.	A2	250	0,16	3,876	3,818	3,901	3,865
3.	A3	250	0,23	4,703	4,97	4,945	4,873
4.	B1	360	0,09	1,932	2,098	1,969	2,000
5.	B2	360	0,16	2,689	2,586	2,569	2,615
6.	B3	360	0,23	4,493	4,506	4,514	4,504
7.	C1	500	0,09	0,872	0,974	0,988	0,945
8.	C2	500	0,16	2,096	2,272	2,204	2,191
9.	C3	500	0,23	4,000	4,187	3,927	4,038

Pada tabel 3 tersebut kode sampel A, B, dan C menunjukkan variasi kecepatan *spindle* sedangkan 1, 2, dan 3 pada kode sampel menunjukkan variasi *feed rate*. Contoh perhitungan nilai rata-rata kekasaran permukaan pada spesimen A1 dengan *feed rate* 0,09 mm/rev dan putaran *spindle* 250 RPM, dengan menggunakan persamaan untuk menghitung rata-rata kekasaran permukaan perspesimen berikut ini

Diketahui $Ra_1 = 3,442$, $Ra_2 = 3,637$, dan $Ra_3 = 3,686$ serta $n = 3$

$$Ra = \frac{3,442 + 3,637 + 3,686}{3} = 3,588 \mu\text{m}$$

Selanjutnya nilai kekasaran permukaan kecepatan *Spindle* dan *Feed Rate* dapat dilihat pada Tabel 4. Tabel 4. Nilai Kekasaran Permukaan Kecepatan *Spindle* dan *Feed Rate*

Kecepatan <i>Spindle</i> n (RPM)	<i>Feed Rate</i> f (mm/rev)	Kecepatan Pemakanan F = f . n (mm/menit)	Nilai kekasaran rata-rata (Ra)	Tingkat Kekasaran Permukaan
250	0,09	22,5	3,588	N8
	0,16	40	3,865	N8
	0,23	57,5	4,873	N9
360	0,09	32,4	2,000	N7
	0,16	57,6	2,615	N8
	0,23	82,8	4,504	N8
500	0,09	45	0,945	N6
	0,16	80	2,191	N7
	0,23	115	4,038	N7

Variasi kecepatan *spindle* dan *feed rate* mempengaruhi kecepatan pemakanan pada proses bubut, hal ini bisa diketahui menggunakan rumus (Persamaan 2) dan bisa dilihat contoh perhitungan berikut ini.

Diketahui : $f = 0,09$ mm/rev

$n = 250$ RPM

maka kecepatan pemakannya adalah :

$$F = f \cdot n$$

$$= 0,09 \times 250 = 22,5 \text{ mm/menit}$$

Artinya pahat bergerak 22,5 mm setiap menit sepanjang benda kerja dan apabila kita sesuaikan dengan tabel tingkat kekasaran permukaan ISO (Tabel 2), maka tingkat kekasaran permukaan material AISI 4140 menggunakan variasi kecepatan *spindle* 250, 360, 500 dan *feed rate* 0,09; 0,16; 0,23.

Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk mengetahui gambaran umum penyebaran data kekasaran permukaan. Dari 9 data nilai Ra rata-rata diperoleh:

1. Ra rata-rata keseluruhan : 3,180 μm
2. Ra minimum : 0,945 μm (pada kombinasi 500 RPM, $f = 0,09$ mm/rev)

3. Ra maksimum : 4,873 μm (pada kombinasi 250 RPM, $f = 0,23$ mm/rev)

Hal ini menunjukkan bahwa variasi parameter pemotongan memberikan rentang kekasaran permukaan yang cukup lebar, dari permukaan relatif halus (mendekati kelas N6–N7) hingga cukup kasar (sekitar N9–N10 berdasarkan tabel ISO pada Bab II).

Pengaruh kecepatan putaran *spindle* terhadap kekasaran permukaan dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 5. yang merupakan ringkasan nilai Ra rata-rata untuk setiap kombinasi RPM dan *feed rate*.

Tabel 5. Nilai Ra Rata - Rata Kombinasi Putaran *Spindle* Dan *Feed Rate*

RPM \ <i>Feed</i> (mm/rev)	0,09	0,16	0,23
250	3,588	3,865	4,873
360	2,000	2,615	4,504
500	0,945	2,191	4,038

Jika dilihat pada kolom *feed* yang sama *feed rate* 0,09 mm/rev di putaran *spindle* 250 RPM memiliki nilai Ra 3,588 μm , selanjutnya pada putaran *spindle* 360 RPM nilai Ra menjadi 2,000 μm dan pada putaran *spindle* 500 RPM nilai Ra menurun menjadi 0,945 μm . Pada *feed rate* 0,16 mm/rev di putaran *spindle* 250 RPM memiliki nilai Ra 3,865 μm , selanjutnya pada putaran *spindle* 360 RPM nilai Ra menjadi 2,615 μm dan pada putaran *spindle* 500 RPM nilai Ra menurun menjadi 2,191 μm . Pada *feed rate* 0,23 mm/rev di putaran *spindle* 250 RPM memiliki nilai Ra 4,873 μm , selanjutnya pada putaran *spindle* 360 RPM nilai Ra menjadi 4,504 μm dan pada putaran *spindle* 500 RPM nilai Ra menurun menjadi 4,038 μm . Hal ini dapat diinterpretasikan:

1. Peningkatan RPM cenderung mengurangi kekasaran permukaan untuk semua nilai *feed rate*.
2. Secara fisik, pada kecepatan putar yang lebih tinggi gaya potong menjadi lebih stabil, getaran berkurang, dan tinggi geram per unit panjang permukaan menjadi lebih kecil, sehingga profil permukaan menjadi lebih halus.

Selanjutnya, jika dilihat dari baris RPM yang sama Tabel 4.3 Pada putaran *spindle* 250 RPM di *feed rate* 0,09 memiliki nilai Ra 3,588 μm , pada *feed rate* 0,16 nilai Ra naik menjadi 3,865

dan pada *feed rate* 0,23 nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,873 μm . Pada putaran *spindle* 360 RPM di *feed rate* 0,09 memiliki nilai Ra 2,000 μm , pada *feed rate* 0,16 nilai Ra naik menjadi 2,615 dan pada *feed rate* 0,23 nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,504 μm . Pada putaran *spindle* 500 RPM di *feed rate* 0,09 memiliki nilai Ra 0,945 μm , pada *feed rate* 0,16 nilai Ra naik menjadi 2,191 dan pada *feed rate* 0,23 nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,038 μm . Hal ini bisa diinterpretasi:

1. Semakin besar *feed rate*, kekasaran permukaan semakin tinggi pada semua level RPM.
2. Secara teori, hal ini konsisten dengan konsep geometri pemotongan: semakin besar f , jarak antar “bekas pahat” (*tool marks*) semakin besar sehingga puncak–lembah permukaan menjadi lebih kasar (Ra naik).

Dari kombinasi-kombinasi di Tabel 5 juga dapat diamati bahwa interaksi RPM dan *Feed Rate*:

1. Pada *feed rate* rendah (0,09 mm/rev), pengaruh peningkatan RPM terhadap penurunan kekasaran permukaan sangat nyata, dari Ra 3,588 μm menjadi 0,945 μm .
2. Pada *feed rate* tinggi (0,23 mm/rev), meskipun RPM dinaikkan dari 250 ke 500 RPM, nilai Ra masih tetap berada pada kisaran $> 4 \mu\text{m}$, yang berarti permukaan tetap relatif kasar.

Hal ini menunjukkan bahwa:

1. *Feed rate* yang besar dapat mengalahkan efek positif RPM tinggi. Walaupun RPM dinaikkan, bila *feed* terlalu besar, permukaan tetap tidak halus.
2. Secara praktis di bengkel, operator tidak bisa hanya menaikkan RPM saja untuk mengejar kehalusan permukaan; *feed rate* wajib disesuaikan.

Untuk menguji apakah pengaruh RPM dan *feed rate* terhadap kekasaran permukaan signifikan secara statistik, dilakukan analisis variansi (ANOVA) dua arah dengan faktor:

1. Faktor A : Kecepatan putaran *spindle* (RPM) $\rightarrow$ 3 level (250, 360, 500)
2. Faktor B : *Feed rate* (mm/rev) $\rightarrow$ 3 level (0,09; 0,16; 0,23)

Ringkasan hasil Analisis Variansi ditunjukkan pada Tabel 6. Hasil Analisis Variansi (ANOVA) Terhadap Kekasaran Permukaan.

Tabel 6. Hasil Analisis Variansi (ANOVA) Terhadap Kekasaran Permukaan

ANOVA: Two-Factor Without Replication						
SUMMARY	Count	Sum	Average	Variance		
RPM (250)	3	12,326	4,108667	0,457336		
RPM (360)	3	9,119	3,039667	1,70276		
RPM (500)	3	7,174	2,391333	2,421762		
Feed Rate (0,9)	3	6,533	2,177667	1,770036		
Feed Rate (0,16)	3	8,671	2,890333	0,757425		
Feed Rate (0,23)	3	13,415	4,471667	0,17509		
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
RPM	4,512331	2	2,256165	10,10857	0,027282	6,944272
Feed Rate	8,270945	2	4,135472	18,52866	0,009492	6,944272
Error	0,892773	4	0,223193			
Total	13,67605	8				

Dengan taraf signifikansi $\alpha = 0,05$, kriteria pengambilan keputusan adalah: Jika *p-value* $< 0,05$, maka H_0 ditolak dan faktor tersebut berpengaruh signifikan.

Dari tabel 4.4 terlihat bahwa:

1. Kecepatan *spindle* memiliki *p-value* $0,02 < 0,05$ berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan.
2. *Feed rate* memiliki *p-value* $0,00 < 0,05$ berpengaruh sangat signifikan terhadap kekasaran permukaan.

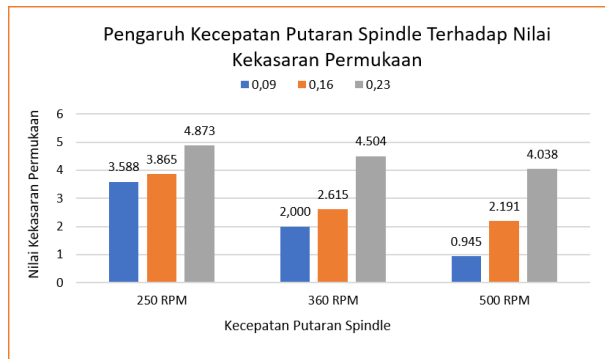
Dengan demikian, hipotesis H_1 pada Bab II bahwa kecepatan *spindle*, *feed rate*, dan interaksinya berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan material AISI 4140 diterima, sedangkan hipotesis nol (H_0) ditolak.

3.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengolahan data, analisis grafik, dan ANOVA, beberapa poin penting dapat dibahas sebagai berikut:

1). Pengaruh Kecepatan *Spindle* Terhadap Kekasaran Permukaan

Pengaruh kecepatan putaran *spindle* terhadap kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 5.

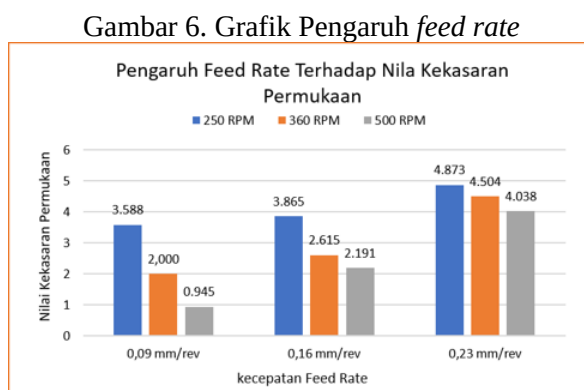


Gambar 5. Pengaruh kecepatan putaran *spindle* terhadap kekasaran permukaan

Berdasarkan Gambar 5., pengaruh kecepatan putaran *spindle* terhadap kekasaran permukaan nilai Ra pada *feed rate* 0,09 di kecepatan *spindle* 250 RPM nilai Ra 3,588 μm lalu di 360 RPM nilai Ra turun menjadi 2,000 μm dan di 500 RPM nilai Ra turun lagi menjadi 0,945 μm . Selanjutnya pada *feed rate* 0,16 di kecepatan *spindle* 250 RPM nilai Ra 3,865 μm lalu di 360 RPM nilai Ra turun menjadi 2,615 μm dan di 500 RPM nilai Ra turun lagi menjadi 2,191 μm . Kemudian pada *feed rate* 0,23 di kecepatan *spindle* 250 RPM nilai Ra 4,873 μm lalu di 360 RPM nilai Ra turun menjadi 4,504 μm dan di 500 RPM nilai Ra turun lagi menjadi 4,038 μm . Hal ini sejalan dengan teori pemotongan logam dan penelitian terdahulu pada Bab II, di mana peningkatan kecepatan potong (yang sebanding dengan RPM) dapat menghasilkan permukaan yang lebih halus sampai batas tertentu, karena potongan geram menjadi lebih tipis dan getaran berkurang.

2). Pengaruh *Feed Rate* Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan

Pengaruh *Feed Rate* Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan pada kecepatan putaran *spindle* 250 RPM, 360 RPM, dan 500 RPM dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengaruh *feed rate*

Pada Gambar 6, pengaruh *feed rate* terhadap kekasaran permukaan terbukti menjadi faktor

yang paling dominan terhadap peningkatan kekasaran permukaan. Terlihat pada putaran *spindle* 250 RPM di *feed rate* 0,09 nilai Ra 3,588 μm lalu pada *feed rate* 0,16 mm/rev nilai Ra meningkat menjadi 3,865 μm dan pada *feed rate* 0,23 mm/rev nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,873 μm . selanjutnya pada putaran *spindle* 360 RPM di *feed rate* 0,09 nilai Ra 2,000 μm lalu pada *feed rate* 0,16 mm/rev nilai Ra meningkat menjadi 2,615 μm dan pada *feed rate* 0,23 mm/rev nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,504 μm . Kemudian pada putaran *spindle* 500 RPM di *feed rate* 0,09 nilai Ra 0,945 μm lalu pada *feed rate* 0,16 mm/rev nilai Ra meningkat menjadi 2,191 μm dan pada *feed rate* 0,23 mm/rev nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,038 μm . Secara fisik, semakin besar gerak pemakanan, semakin tebal dan besar geram yang terbentuk dalam satu putaran sehingga puncak–lembah pada permukaan benda kerja semakin jelas.

Kombinasi parameter yang menghasilkan nilai Ra terkecil yaitu dengan pengaturan parameter kecepatan *spindle* di 500 RPM dan kecepatan *feed rate* 0,09 mm/rev dengan kedalaman pemotongan 0.5 mm. Nilai ini berada dalam kisaran kelas kekasaran N6, sehingga cukup baik untuk komponen-komponen yang membutuhkan permukaan relatif halus tanpa proses *finishing* lanjutan yang berat.

Hasil ini dapat dijadikan acuan awal bagi operator di bengkel mesin bubut konvensional:

1. Untuk pekerjaan AISI 4140 yang membutuhkan permukaan halus, disarankan menggunakan RPM tinggi (500 RPM) dan *feed* rendah (0,09 mm/rev) dengan kedalaman potong 0,5 mm.
2. Untuk pekerjaan yang tidak terlalu menuntut kekasaran rendah dan lebih mementingkan kecepatan produksi, *feed rate* dapat dinaikkan dengan konsekuensi meningkatnya kekasaran permukaan.
3. Dengan adanya rekomendasi parameter ini, diharapkan pengulangan pekerjaan (*rework*) dan keausan pahat yang tidak perlu dapat dikurangi.

4. Kesimpulan

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi kecepatan putaran *spindle* (RPM) dan *feed rate* terhadap kekasaran permukaan material AISI 4140 pada proses pembubutan menggunakan mesin bubut konvensional dan hasil analisis statistik deskriptif serta uji ANOVA, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kecepatan putaran *spindle* (RPM) berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan (Ra) material AISI 4140. Terlihat pada *feed rate* 0,09 di kecepatan *spindle* 250 RPM nilai Ra 3,588 μm lalu di 360 RPM nilai Ra turun menjadi 2,000 μm dan di 500 RPM nilai Ra turun lagi menjadi 0,945 μm . Selanjutnya pada *feed rate* 0,16 di kecepatan *spindle* 250 RPM nilai Ra 3,865 μm lalu di 360 RPM nilai Ra turun menjadi 2,615 μm dan di 500 RPM nilai Ra turun lagi menjadi 2,191 μm . Kemudian pada *feed rate* 0,23 di kecepatan *spindle* 250 RPM nilai Ra 4,873 μm lalu di 360 RPM nilai Ra turun menjadi 4,504 μm dan di 500 RPM nilai Ra turun lagi menjadi 4,038 μm . Jadi semakin tinggi RPM maka gaya potong lebih stabil dan geram menjadi lebih tipis sehingga menghasilkan permukaan yang lebih halus.
2. *Feed rate* berpengaruh sangat signifikan dan menjadi faktor dominan terhadap nilai kekasaran permukaan. Terlihat pada putaran *spindle* 250 RPM di *feed rate* 0,09 nilai Ra 3,588 μm lalu pada *feed rate* 0,16 mm/rev nilai Ra meningkat menjadi 3,865 μm dan pada *feed rate* 0,23 mm/rev nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,873 μm . selanjutnya pada putaran *spindle* 360 RPM di *feed rate* 0,09 nilai Ra 2,000 μm lalu pada *feed rate* 0,16 mm/rev nilai Ra meningkat menjadi 2,615 μm dan pada *feed rate* 0,23 mm/rev nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,504 μm . Kemudian pada putaran *spindle* 500 RPM di *feed rate* 0,09 nilai Ra 0,945 μm lalu pada *feed rate* 0,16 mm/rev nilai Ra meningkat menjadi 2,191 μm dan pada *feed rate* 0,23 mm/rev nilai Ra meningkat lagi menjadi 4,038 μm . Terlihat bahwa semakin besar *feed rate* nilai Ra rata-rata meningkat dengan cukup tajam. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya jarak antar puncak bekas potongan pahat pada permukaan benda kerja.
3. Nilai kekasaran permukaan terbaik yang diperoleh pada penelitian ini yaitu dengan pengaturan parameter kecepatan *spindle* di 500 RPM dan kecepatan *feed rate* 0,09 mm/rev dengan kedalaman pemotongan 0.5 mm. Kombinasi ini menghasilkan nilai Ra rata-rata sebesar 0,945 μm dengan kelas kekasaran N6.

4.2. Saran

Saran dari penulis untuk aplikasi hasil penelitian dan pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

Karena tidak semua tahapan pembubutan harus menghasilkan nilai kekasaran yang rendah (halus), penggunaannya harus diperhatikan selama tahap permulaan atau tahap penyelesaian proses bubut. Hal ini sangat terkait dengan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan pekerjaan. Jika prioritas produksi adalah kecepatan pengerjaan (produktivitas), *feed rate* dapat dinaikkan dengan konsekuensi penurunan kualitas permukaan.

Daftar Rujukan

- Abdilah, T., & Sinurat, F. K. (2024). Analisa Kekasaran Permukaan Besi ST-41 Hasil Pembubutan Lurus Pengaruh Cairan Pendingin Dengan Alat Uji Surface Roughness. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 7(1), 8–16. <https://doi.org/10.30596/rmme.v7i1.17091>
- B.S.Widodo, A.R. Krisnanda, & K. A. Widi. (2023). Pemakanan terhadap Kekasaran Permukaan dan Kekerasan Baja AISI 1020 pada Mesin Bubut CNC. *JURNAL FLYWHEEL*, 14(2), 74–81.
- Burrahman, M., Mawardi, M., & Murtadhahadi, M. (2024). Pengaruh Variasi Putaran Spindel Dan Kedalaman Pemotongan Terhadap Kekasaran Permukaan Baja AISI 4340 Pada Proses Bubut Konvensional. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 8(2), 104. <https://doi.org/10.30811/jmst.v8i2.5759>
- Faturrahman, A. (2024). *Analysis of the effect of variations in cutting speed and feed depth in the ST42 steel turning process on surface roughness.*
- Halim, A. (2021). *Pengaruh Putaran Spindel dan Depth of Cut Material AISI 4140 untuk Pembuatan Bushing pada Proses Bubut Konvensional.* 23(4).
- Hamdani, D., Irzal, I., Helmi, N., & Rifelino, R. (2020). Effect of Cutting Condition on the Surface Roughness Level of ST 42 Steel in Conventional Lathe Processes. *MOTIVATION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, 2(3), 11–20. <https://doi.org/10.46574/motivaction.v2i3.64>
- Lubis, S. Y., Djamil, S., Adianto, A., Santosa, A., & Vm, E. (2021). Variasi Kecepatan Pemotongan Proses pembubutan baja AISI 4140 Terhadap Keausan dan Umur Mata Pahat Karbida. *POROS*, 17(1), 26–34.

- <https://doi.org/10.24912/poros.v17i1.15394>
- Mahardika, S. (2020). Analisa Rekayasa Sifat Mekanik Baja AISI 4140 dengan Variasi Suhu Tempering Untuk Meningkatkan Keuletan dan Kekerasan Material. *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 6(1), 64–69. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v6i1.2306>
- Manta, F., A.M, C. Q., & Basith, R. A. (2023). Analisis proses pembubutan aisi 1020 pada kekasaran permukaan material dan keausan pahat analysis of aisi 1020 manufacturing process on material surface roughness and tool wear. *Journal of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials and Energy*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v7i1.7703>
- Mu'arif, S., Hanifi, R., & Santosa, A. (2024). Analisa Kekasaran Permukaan Material AISI 1045 pada Proses Bubut Menggunakan Pahat Potong dengan Sudut Potong Utama Kr 90o dan Pengaruhnya Terhadap Daya Pemesinan. *Infomatek*, 26(2), 297–304. <https://doi.org/10.23969/infomatek.v26i2.19462>
- Neno, R. (2023). *Analisa Sifat Kekerasan dan Struktur Mikro baja AISI 4140 akibat Proses Hardening pada Material sripsi*, ITN MALANG]. <https://eprints.itn.ac.id/12588/>
- Novianto, D. R. (2024). *Pengaruh Variasi Temperatur Quenching dan Media Pendingin Oli pada Material Baja AISI 4140 terhadap Kekerasan dan struktur Mikro*
- Ratnawati, R., Santoso, T., & Yuono, L. D. (2024). Pengaruh Kecepatan Pemakanan Dan Kecepatan Putaran Spindel Terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan Material ASSAB 709 / SCM 440 Pada Proses Bubut. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 13(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v13i2.3824>
- Rosandi, A., Sumbodo, W., Yudiono, H., & Kriswanto, K. (2021). Analisis Variasi Kecepatan Potong Dan Kedalaman Potong Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Dan Getaran Pada Pembubutan Silindris Material Baja ST 60. *Jurnal Inovasi Mesin*, 3(1), 1–12. <https://doi.org/10.15294/jim.v3i1.46597>
- Salikin, I., Yudo, E., & Idiar. (2022). Analisa Nilai Kekasaran Permukaan Material Baja ST 41 pada Proses Permesinan Bubut CNC dengan Metode TAGUCHI. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan*, 2(01), 464–470.
- Siregar, M. Y., & Yunus, S. M. (2020). Pengaruh Getaran Pahat terhadap Aus Pahat Karbida H10 N15 Menggunakan Bahan Permesinan Aisi 4140. *Mekanik*, 6(1), 51–60.
- Wicaksono, B. B., Rosehan, & Tanujaya, H. (2024). Analisis Perubahan Kekerasan Material Terhadap Pembubutan. *V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, 9(2), 8–17. <https://doi.org/10.36526/v-mac.v9i2.3967>