

Machining Constraint Analysis of CNC Turning in the Manufacturing Process of Titanium Ti-6Al-4V ELI Bone Screw Implants

Analisis Kendala Pemesinan CNC Turning pada Proses Manufaktur Implan Bone Screw Material Titanium Ti-6Al-4V ELI

Adinda Eka Putri¹, Iswanto²

Email corresponding author: iswanto@umsida.ac.id

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Abstract. The CNC turning process in manufacturing Titanium Ti-6Al-4V ELI Bone Screw implants frequently encounters challenges due to the material's difficult-to-cut characteristics. This study aims to evaluate technical machining constraints and identify mitigation strategies on the production floor. A qualitative research methodology was employed through field observations, engineering drawing analysis, and structured interviews with machine operators. The results revealed three primary issues: chip nesting that scratches product surfaces, high tool wear rates with breakage risks, and dimensional deviations caused by workpiece deflection. Problem resolution was achieved by optimizing coolant flow and pressure, utilizing bar stops and tailstocks to maintain concentricity, adjusting tool coordinate offsets, and standardizing Quality Control (QC) inspections. In conclusion, Titanium machining issues can be effectively resolved through machine setting adjustments and strict quality control.

Keywords - CNC turning, Titanium Ti-6Al-4V ELI, Bone Screw, tool wear, quality control

Abstrak. Proses pemesinan CNC turning pada manufaktur implan Bone Screw berbahan Titanium Ti-6Al-4V ELI sering menghadapi kendala akibat karakteristik material yang sulit dipotong. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kendala teknis pemesinan dan mengidentifikasi strategi penanggulangannya diperlukan untuk efisiensi produksi massal di industri. Metode penelitian dilakukan secara kualitatif melalui observasi lapangan, analisis gambar kerja, dan wawancara terstruktur dengan operator mesin. Hasil pengamatan menunjukkan tiga kendala utama, yaitu lilitan tatal yang menggores permukaan produk, tingginya laju keausan serta risiko patah pahat, dan deviasi dimensi akibat defleksi benda kerja. Penyelesaian masalah dilakukan melalui optimalisasi debit dan tekanan coolant, penggunaan bar stop dan tailstock untuk menjaga sentrisitas, penyesuaian offset koordinat pahat, serta standarisasi inspeksi QC (Quality Control). Dengan demikian, kombinasi kendala mekanis dapat ditanggulangi secara efektif melalui penyesuaian setting mesin dan kontrol kualitas yang ketat.

Kata Kunci - CNC turning, Titanium Ti-6Al-4V ELI, Bone Screw, keausan pahat, kontrol kualitas

I. PENDAHULUAN

Implan tulang memiliki peran penting dalam dunia medis, baik untuk mempercepat proses pemulihan tulang yang patah maupun menggantikan fungsi sendi yang rusak akibat penyakit degeneratif. Di antara beberapa pilihan logam medis seperti paduan kobalt dan *stainless steel*, titanium merupakan bahan yang paling unggul karena memiliki bobot yang ringan, ketahanan korosi yang tinggi, serta sifat biokompatibilitas yang baik [1]. Jenis titanium yang paling sering digunakan untuk manufaktur implan Bone Screw adalah Titanium Ti-6Al-4V ELI (*Extra Low Interstitial*). Material ini dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap bobot yang tinggi, tahan terhadap suhu tinggi, serta memiliki sifat biomekanis yang sesuai dengan jaringan tubuh manusia [2].

Meskipun memiliki keunggulan mekanis dan biologis yang baik, proses pemesinan paduan titanium di lantai produksi menghadapi kendala teknis yang cukup kompleks. Titanium tergolong material yang sulit dikerjakan (*difficult-to-machine*) akibat konduktivitas termalnya yang rendah serta sifat kimianya yang mudah bereaksi dengan mata pahat [3]. Karakteristik pemotongan (*machinability*) yang buruk ini menyebabkan geram mudah menempel pada ujung potong, sehingga berpotensi memicu *chipping* dan keausan pahat sebelum waktunya [4]. Gerak makan dan putaran spindel berpengaruh terhadap keausan pahat. Semakin besar gerak makan, maka keausan pahat akan semakin tinggi. Sebaliknya, semakin kecil gerak makan, maka keausan pahat akan semakin rendah. Hubungan antara gerak makan dan keausan pahat menunjukkan hubungan positif. Sementara itu, semakin besar putaran spindel, maka keausan pahat cenderung semakin rendah. Sebaliknya, semakin kecil putaran spindel, maka keausan pahat akan semakin tinggi. [5]. Pemilihan parameter pemotongan yang kurang tepat dapat menyebabkan berbagai masalah selama proses pembubutan, seperti terjadinya deformasi material, getaran, pembentukan geram yang tidak stabil, meningkatnya suhu pada area pemotongan, serta menurunnya kualitas permukaan benda kerja [6].

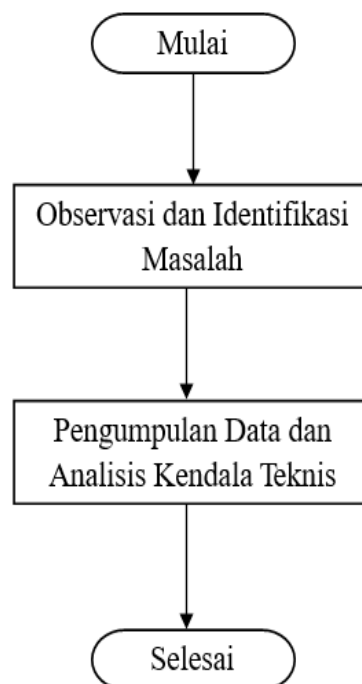
Tantangan pemesinan titanium tidak hanya terbatas pada masalah panas dan gesekan, melainkan juga bentuk geram (*chip*) yang dihasilkan. Pembubutan kontinu pada material ulet ini cenderung menghasilkan geram berbentuk

pita panjang dan tajam yang menggesek permukaan pahat secara terus-menerus, sehingga memperpendek umur pahat (*tool life*) [7]. Fenomena lilitan geram (*chip nesting*) tersebut berpotensi menggores permukaan benda kerja, memperburuk kekasaran permukaan, serta memperlama waktu siklus produksi [8]. Sebagai langkah pencegahan, penerapan cairan pendingin (*coolant*) efektif dalam menurunkan suhu potong, mengurangi gesekan, dan mencegah korosi pada logam [9]. Penggunaan jenis cairan pendingin yang sesuai dapat membantu mengurangi ketebalan tatal sehingga gaya potong yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Pada proses pemesinan dengan kecepatan potong tinggi, diperlukan cairan pendingin dengan kemampuan menyerap dan membuang panas yang baik karena terjadi gesekan yang cukup besar antara pahat dan benda kerja [10]. Selain sistem pendingin, ketepatan pemilihan parameter potong, metode pemesinan, dan geometri *insert* yang divalidasi melalui simulasi peranti lunak juga sangat menentukan presisi komponen [11]. Seluruh upaya teknis ini bermuara pada penguatan pengendalian kualitas (*quality control*) untuk menjaga agar dimensi produk tetap sesuai dengan toleransi gambar kerja serta menekan angka produk cacat (*reject*) [12]. Pemilihan kombinasi parameter yang tidak tepat dapat menimbulkan deformasi material, getaran, pembentukan geram yang tidak stabil, peningkatan temperatur lokal, serta kerusakan permukaan benda kerja

Meskipun penelitian-penelitian terdahulu telah banyak membahas keausan pahat dan simulasi pemesinan titanium secara teoritis, kajian yang mengintegrasikan penanggulangan lilitan geram, keausan pahat, dan deviasi dimensi akibat defleksi secara simultan pada lini manufaktur nyata *Bone Screw* masih terbatas. Padahal di lantai produksi nyata, kombinasi dari ketiga kendala teknis tersebut secara langsung menurunkan efisiensi produksi dan stabilitas kualitas produk medis. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kendala teknis pada proses pembubutan CNC *Bone Screw* Titanium Ti-6Al-4V ELI serta merumuskan langkah penanggulangannya secara efektif di lantai produksi.

II. METODE

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif yang berfokus pada studi kasus di lantai produksi industri alat kesehatan. Pendekatan ini dipilih untuk mengevaluasi dan menganalisis secara mendalam kendala teknis yang terjadi pada proses pemesinan CNC *turning* dalam pembuatan implan *Bone Screw* berbahan Titanium Ti-6Al-4V ELI, serta merumuskan tindakan korektif yang diterapkan secara nyata di lapangan.



Gambar 1 Flowchart



Gambar 2 Mesin Hardik CNC 100A

Mesin bubut merupakan salah satu mesin perkakas yang digunakan untuk membentuk benda kerja dengan cara memutar benda kerja pada sumbunya. Proses pembubutan menggunakan pahat bermata potong untuk mengurangi material pada permukaan benda kerja. Mesin bubut umumnya digunakan untuk menghasilkan benda kerja dengan bentuk silindris [13].

Mesin Hardik CNC 100A merupakan jenis mesin bubut CNC (*CNC Turning Center*) kategori ringkas (*compact*) yang dirancang khusus untuk pemesinan presisi tinggi pada komponen berukuran kecil hingga sedang. Dalam penerapannya, mesin horizontal ini umumnya dipadukan dengan pengumpan batang otomatis (*automatic bar feeder*) guna mendukung manufaktur massal secara kontinu dan efisien.

Secara karakteristik, Hardik 100A unggul pada tingkat kekakuan (*rigidity*) struktur serta akurasi pengulangan tinggi berkat penggunaan *linear motion guideway* dan *ball screw* presisi. Mesin ini didukung oleh sistem kendali numerik standar industri yang responsif, sistem pelumasan otomatis untuk penggunaan jangka panjang, serta desain bodi yang hemat ruang (*small footprint*).

Dari segi spesifikasi umum, mesin ini mampu menangani pemrosesan material batang berdiameter kecil hingga sedang (kapasitas umum 20–30 mm) dengan cekam hidrolik (*hydraulic chuck*). Performa pemotongannya didorong oleh motor spindel berkecepatan tinggi hingga ribuan RPM, serta didukung sistem dudukan pahat (*gang tooling* atau *turret*) untuk pergantian alat potong yang cepat, sistem pendingin (*coolant system*), dan unit MPG (*Manual Pulse Generator*) untuk akurasi pengaturan awal (*setup*).

Tabel 1 Spesifikasi Mesin Hardik CNC 100A

No	Deskripsi	Spesifikasi
1	Model Mesin	CNC-100A
2	Nomor Mesin	HCA/ M22/ 138
3	Tahun Pembuatan	2022
4	Tegangan Kendali	+24 V DC
5	Berat Mesin	2000 kg (2 Ton)
6	Tegangan Suplai	415 V, 3 Fasa (3 PH), 50 Hz
7	Arus Pengenal	20 A
8	Kapasitas Daya	10 Kva
9	Ukuran Kabel	6 mm ² (SQMM)



Gambar 3 Bone Screw

Objek yang diteliti dalam proses manufaktur ini adalah implan *Bone Screw* berbahan paduan Titanium Ti-6Al-4V ELI (*Extra Low Interstitial*). Implan ini berfungsi sebagai komponen fiksasi tulang pada bedah ortopedi. Pada penelitian ini, fokus pengamatan dilakukan pada proses pembentukan geometri *cortical screw*, yang meliputi pembubutan diameter luar, pembuatan alur leher (*under-cut*), pembentukan ulir presisi, serta pembuatan soket pengunci (*Hex drive*) pada bagian kepala *screw*.



Gambar 4 Jenis Insert/Tool

Dalam pembuatan *bone screw*, deretan *insert* dan perkakas potong tersebut bekerja secara bertahap untuk membentuk geometri *screw* yang presisi dari bahan titanium. *Insert* segitiga (TNMG) digunakan untuk proses pemosisian dan pembentukan kontur luar (*roughing/turning*) pada batang titanium, sedangkan *insert* belah ketupat lancip (VCMT) dan *insert grooving/threading* berfungsi membentuk profil alur, kemiringan lancip, serta ulir presisi (*cortical thread*) sepanjang badan *screw*. Selanjutnya, alat pemotong bentuk khusus (*form tool*) membentuk lubang *Hex*, sementara kombinasi *center drill* dan *twist drill* bertugas membuat titik acuan (*centering*) serta mengebor lubang awal pada kepala *screw* untuk pembuatan soket pengunci (profil *Hex*).

Tabel 2 Spesifikasi Insert/Tool

No	Jenis Insert / Tool	Tipe / Bentuk	Fungsi Kerja pada Pembuatan <i>Bone Screw</i>
1	<i>Triangular Turning Insert</i>	Tipe TNMG	Pembubutan kasar (<i>roughing</i>) diameter luar batang titanium untuk membentuk pola dasar <i>screw</i> .
2	<i>Custom Form Tool (Hexagon Profile)</i>	<i>Profile Tool</i>	Pembentukan profil khusus, pembuatan lubang <i>Hex</i>
3	<i>Rhombic Profiling Insert</i>	Tipe VCMT	Pembubutan detail (<i>profiling/finishing</i>) dan membentuk kontur alur ulir lancip yang butuh jangkauan sempit.
4	<i>Threading Insert</i>	Tipe <i>Square Insert</i>	Pembuatan alur utama dan pembentukan ulir presisi (<i>thread turning</i>) sepanjang badan <i>cortical screw</i> .
5	<i>Center Drill</i>	<i>Solid Carbide 90°/120°</i>	Pembuatan titik awal (<i>centering</i>) dan sudut chamfer pada kepala sekrup sebelum proses pengeboran.
6	<i>Twist Drill Bit</i>	<i>Micro Carbide Drill</i>	Pengeboran lubang awal pada kepala <i>screw</i> untuk pembuatan soket pengunci (<i>Hex</i> atau <i>Torx drive</i>).

Untuk mendukung kinerja seluruh perkakas potong tersebut, proses pemesinan diterapkan pada bahan baku batangan bulat (*round bar*) Titanium Ti-6Al-4V ELI (ASTM F136). Pengendalian suhu dan pembersihan tatal di area potong dilakukan menggunakan cairan pendingin (*coolant*) berbasis emulsi (*water-soluble cutting fluid*) yang

disempitkan secara kontinu. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung terhadap kondisi proses dan keausan pahat di lantai produksi, sedangkan validasi presisi dimensi produk *bone screw* diukur menggunakan *digital caliper* untuk memastikan kesesuaian batas toleransi ± 0.04 mm dengan standar *Quality Control* (QC) perusahaan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penanggulungan Lilitan Total (*Chip Nesting*) pada Pemessinan Titanium Ti-6Al-4V ELI

Dalam proses pembubutan *Bone Screw* berbahan Titanium Ti-6Al-4V ELI, kendala utama yang sering terjadi pada kondisi pemotongan awal adalah terbentuknya tatal berkesinambungan (*continuous chip*) yang panjang dan ulet. Tatal tersebut tidak mudah terputus sehingga cenderung melilit pada benda kerja, suatu fenomena yang dikenal sebagai *chip nesting*. Secara saintifik, pembentukan tatal kontinu ini terjadi karena paduan titanium varian ELI memiliki tingkat keuletan (*ductility*) dan ketangguhan *fracture* yang tinggi pada suhu pemotongan rata-rata sehingga tidak memicu keretakan lokal pada tatal.

Fenomena lilitan tatal ini memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap kualitas komponen dan efisiensi produksi. Tatal panjang yang tajam dan melilit benda kerja yang sedang berputar secara mekanis menggores permukaan *Bone Screw*, sehingga meningkatkan nilai kekasaran permukaan (*surface roughness*) serta memicu risiko produk cacat (*reject*). Selain itu, akumulasi tatal di sekitar area potong menghalangi penetrasi cairan pendingin (*coolant*) menuju ujung pahat (*tool tip*).

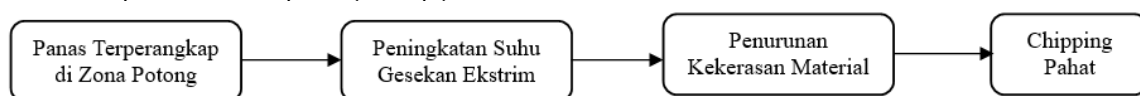
Tabel 3 Tindakan Korektif Sebelum-Sesudah Penyesuaian *Coolant*

Parameter Pengamatan	Sebelum Penyesuaian <i>Coolant</i>	Sesudah Penyesuaian <i>Coolant</i>
Bentuk Tatal	Pita panjang melilit (kontinu)	Terputus pendek-pendek (<i>C-type</i>)
Evakuasi Tatal	Sering tersumbat pada pahat	Lancar membilas keluar area kerja
Kondisi Permukaan	Terdapat goresan fisik	Halus dan bebas goresan tatal

Sebagai langkah tindakan korektif, dilakukan penataan ulang posisi *nozzle* dan peningkatan debit aliran cairan pendingin berbasis emulsi (*water-soluble cutting fluid*). *Nozzle coolant* diarahkan secara presisi ke zona pemotongan tepat di titik kontak antara tatal dan muka pahat. Tekanan cairan pendingin yang terfokus memberikan gaya hidrodinamis tambahan yang membantu mematahkan tatal menjadi segmen-segmen pendek (*broken chip*), sekaligus menjalankan fungsi *chip flushing*. Penanganan ini terbukti efektif menghilangkan lilitan tatal pada benda kerja, menjaga kebersihan area potong, serta mencegah terjadinya cacat goresan pada permukaan screw, sejalan dengan temuan penelitian terdahulu mengenai pentingnya efektivitas pendinginan bertekanan dalam pembilasan tatal [9].

B. Analisis Keausan Pahat (*Tool Wear*) dan Optimasi Pendinginan

Kendala teknis kedua yang teridentifikasi selama proses produksi *Bone Screw* adalah tingginya laju keausan pada pahat potong *carbide insert*, khususnya pada *rhombic profiling insert* (tipe VCMT/VBMT) dan *grooving/threading insert*. Pahat mengalami keausan tepi (*flank wear*) yang prematur serta keretakan mikro (*chipping*) pada ujung potong sebelum mencapai batas umur pakai (*tool life*) standar.



Gambar 5 Proses Keausan Pahat

Penyebab utama dari penurunan performa pahat ini dijelaskan oleh sifat fisika-termal material Titanium Ti-6Al-4V ELI. Titanium memiliki nilai konduktivitas termal yang sangat rendah ($k \approx 6,7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), jauh lebih rendah dibandingkan material baja atau paduan aluminium. Akibatnya, energi panas berlebih yang timbul dari gesekan antara ujung potong dan geram tidak dapat diserap secara cepat oleh benda kerja maupun tatal. Panas terkonsentrasi di area kontak potong yang relatif sempit, memicu lonjakan suhu lokal yang ekstrem. Suhu tinggi ini mereduksi tingkat kekerasan (*red hardness*) dari lapisan *carbide*, mempercepat laju abrasi, serta memicu reaktivitas kimia antara material pahat dan benda kerja. Fenomena ini menyebabkan terjadinya degradasi termal lokal dan memicu keausan *flank wear* dengan cepat [3], [4].

Tabel 4 Analisis Kendala Teknis Keausan *Tool Wear*

Jenis Kendala Teknis	Faktor Penyebab	Tindakan Solusi / Perbaikan	Hasil Nyata
Profil <i>insert</i> tidak presisi/aus	Konduktivitas termal titanium rendah sehingga panas terperangkap di ujung mata potong	Penyemprotan <i>coolant</i> secara terfokus dan penyesuaian <i>tool offset</i> secara berkala	Suhu zona potong terkendali dan umur pahat lebih awet
keretakan hingga patah	Gaya gesekan ekstrim memicu kelonjakan suhu	Peningkatan debit <i>coolant</i> ke mata pahat untuk meredam suhu berlebih	Meminimalkan resiko pahat patah

Untuk menanggulangi laju kerusakan pahat tersebut, diterapkan kombinasi langkah korektif berupa evaluasi berkala kompensasi koordinat (*tool offset*) dan penyemprotan *coolant* emulsi secara kontinu tanpa terputus. Cairan pendingin emulsi bertindak sebagai media perpindahan panas konvektif yang dengan cepat menyerap energi termal di zona kontak. Penurunan suhu pada ujung potong mencegah pelunakan material insert serta meminimalkan potensi pelekatan material titanium (*built-up edge*/BUE). Dengan pendinginan yang terkontrol dan penyesuaian *offset* pahat secara teratur, umur pakai pahat meningkat secara signifikan, pergantian *insert* dapat diprediksi dengan lebih stabil, dan biaya pemborosan akibat pahat patah tiba-tiba dapat ditekan.

C. Pengendalian Penyimpangan Dimensi dan Defleksi Benda Kerja

Kendala teknis ketiga yang mempengaruhi konsistensi mutu produk adalah timbulnya penyimpangan dimensi pada diameter luar ulir (*cortical thread*) *Bone Screw*. Geometri *Bone Screw* yang memiliki rasio panjang terhadap diameter relatif besar menjadikan komponen ini tergolong fleksibel dan rawan mengalami pelengkungan (*deflection*) selama menerima gaya pemotongan radial saat proses pembubutan berlangsung.

Secara mekanis, gaya pemotongan radial yang ditimbulkan oleh penetrasi *insert* berinteraksi langsung dengan kekakuan struktur (*rigidity*) benda kerja. Ketika pahat bergerak melintas sepanjang badan *screw*, gaya radial mendorong benda kerja menjauhi sumbu pusat mesin. Fenomena defleksi ini mengakibatkan ukuran diameter yang terbentuk di bagian tengah batang cenderung lebih besar dibandingkan bagian ujung yang dekat dengan pencekam (*chuck*), sehingga timbul ketidakrataan dimensi (*tapering effect*). Hal ini berisiko melampaui batas toleransi ketat yang ditetapkan perusahaan, yaitu ± 0.04 mm.

Tabel 5 Tindakan Perbaikan pada Dimensi Ulir *Cortical Screw*

No. Sampel	Sebelum Perbaikan (mm)	Sesudah Perbaikan (mm)	Toleransi QC (mm)	Keterangan
1	+0.058	+0.015	± 0.04	Pass QC
2	+0.045	+0.012	± 0.04	Pass QC
3	+0.062	+0.008	± 0.04	Pass QC
4	+0.051	+0.018	± 0.04	Pass QC
5	+0.049	+0.010	± 0.04	Pass QC

Tindakan perbaikan dilakukan dengan mengoptimalkan penggunaan alat bantu penopang berupa *bar stop* dan penyesuaian penopang *tailstock* pada mesin CNC, serta mengatur ulang tahapan pemotongan kasar (*roughing*) dan penyelesaian (*finishing*). Penambahan penopang fisik di ujung benda kerja meningkatkan kekakuan sistem pengepakan secara signifikan, sehingga mampu meredam gaya pemotongan radial yang bekerja.

Validasi hasil tindakan korektif dilakukan melalui pengukuran dimensi produk akhir menggunakan *digital caliper*. Berdasarkan data evaluasi inspeksi QC pada Tabel 5, sebelum dilakukan perbaikan, penyimpangan dimensi sampel sering melampaui batas toleransi (+0.045 mm hingga +0.062 mm). Setelah penerapan sistem penopang dan kompensasi presisi, seluruh sampel produk *Bone Screw* berada di dalam rentang toleransi standar QC ± 0.04 , dengan tingkat deviasi maksimum hanya mencapai +0.018 mm. Hal ini membuktikan bahwa pengendalian deviasi dimensi dan penerapan tindakan korektif secara terpadu berhasil menjaga stabilitas mutu produk akhir di rantai produksi [12].

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis dan merumuskan langkah penanggulangan teknis pada proses pembubutan CNC *Bone Screw* berbahan Titanium Ti-6Al-4V ELI di lantai produksi. Kendala utama berupa lilitan tatal (*chip*

nesting) dan kecenderungan keausan prematur pada pahat *carbide insert* akibat tingginya akumulasi panas dapat diatasi secara efektif melalui optimasi sistem penyemprotan cairan pendingin emulsi yang terfokus pada zona pemotongan, sehingga mampu mematahkan tatal serta memperpanjang umur pakai pahat. Selain itu, masalah deviasi dimensi akibat defleksi benda kerja berhasil dikendalikan dengan penambahan alat penopang *bar stop/tailstock* dan kompensasi koordinat presisi, yang dibuktikan dari hasil inspeksi dimensi *Bone Screw* menggunakan *digital caliper* dan *screw driver* yang seluruhnya memenuhi standar toleransi *Quality Control* $\pm 0,04$ mm. Sebagai pengembangan selanjutnya dari penelitian ini, perlu dilakukan pengujian laboratorium mengenai pengaruh variasi tekanan tinggi pada sistem pendingin (*high-pressure coolant*) serta pemodelan simulasi elemen hingga (*Finite Element Analysis*) untuk mengoptimalkan geometri pahat potong khusus pemesinan implan medis secara lebih presisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada pimpinan dan staf/operator produksi tempat dilakukannya penelitian yang telah memfasilitasi sarana pemesinan CNC *turning*, alat ukur presisi, serta memberikan dukungan teknis selama pelaksanaan penelitian ini berlangsung. Apresiasi juga diberikan kepada pihak kampus yang telah mendukung kegiatan ini dan penelitian yang dilakukan.

REFERENSI

- [1] F. Mahyudin, H. C. Waskita, D. N. Utomo, H. Suroto, and T. W. Martanto, "Uji Biokompabilitas pada Implan Orthopedi Antara Implan Impor, Implan Lokal dari Material Impor, dan Prototipe Stainless Steel 316L dari Material Lokal," *Qanun Medika-Medical J. Fac. Med. Muhammadiyah Surabaya*, vol. 3, no. 1, pp. 7–13, Jan. 2019.
- [2] G. A. Ibrahi, C. Septiani, A. Hamni, Y. Burhanuddin, S. Harun, and A. Kusnadi, "Optimasi Parameter Pemesinan Ulir Material Titanium Ti-6Al-4V Terhadap Jarak Pitch dan Sudut Ulir Menggunakan Metode Taguchi," *J. Mesin Nusantara*, vol. 6, no. 2, pp. 117–126, Agu. 2023.
- [3] B. Burhanudin, A. Jannah, H. Haikal, and B. Supriyanto, "Studi Parameter Cutting Pada Proses Turning Material Titanium Grade 2," *Teknika*, vol. 11, no. 1, pp. 31–41, Mar. 2026.
- [4] I. S. Aisyah, M. Rusdianto, and A. F. H. Soegiharto, "Studi Pemesinan Ti6246 dengan Jatropha Curcas Sebagai Bio-Lubricant Terhadap Surface Roughness dan Bentuk Geram," in *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa (SENTRA)*, Malang, Indonesia, 2020, pp. 72–79.
- [5] M. M. Rozaq and I. Iswanto, "Analisa Pengaruh Gerak Makan Dan Putaran Spindel Terhadap Keausan Pahat Pada Proses Bubut Konvensional: Analysis of the Effect of Feeding Motion and Spindle Rotation on Tool Wear in Conventional Lathe Processes," *REM (Rekayasa Energi Manufaktur) J.*, vol. 2, no. 1, pp. 13–18, Nov. 2017.
- [6] M. Hafid and M. Mulyadi, "Optimization of Turning Process Parameters of Teflon Material for Surface Roughness Using the Taguchi Method: Optimasi Parameter Proses Bubut Material Teflon terhadap Kekasaran Permukaan Menggunakan Metode Taguchi," *Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Sidoarjo, Indonesia, Preprint*, Agu. 2026.
- [7] R. Rusnaldi and B. Setiyana, "Pengaruh Pemakanan (Feed) Terhadap Geometri Dan Kekerasan Geram Pada High Speed Machining Processes," *Rotasi*, vol. 8, no. 1, pp. 15–20, Jan. 2006.
- [8] A. Wibolo, S. Wahyudi, and S. Sugiarto, "Optimasi parameter pemotongan mesin bubut CNC terhadap kekasaran permukaan dengan geometri pahat yang dilengkapi chip breaker," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 55–63, Mei 2011.
- [9] H. Sucipto, A. Reski Nasution, K. Umurani, and A. M. Siregar, "Pengaruh Putaran Spindle Dan Bahan Spesimen Terhadap Gaya Potong Pada Proses Pemesinan Turning," *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, pp. 65–74, Mar. 2022.
- [10] Y. Alifiana and A. R. Fahrudin, "The Effect of Coolant on the Roughness of CNC Lathe with SUS 304 Stainless Steel Material: Pengaruh Pendingin (Coolant) Terhadap Kekasaran CNC Bubut Dengan Material Stainless Steel SUS 304," *Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Sidoarjo, Indonesia, Preprint*, Agu. 2023.
- [11] A. Gusri and H. Suryadiwansa, "Pemodelan Dan Simulasi Baut Ulir Untuk Penyambung Tulang Retak Dari Material Ti-6Al-4V Eli," *Laporan Penelitian, LPPM Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia*, 2021.
- [12] E. Herlina, F. H. E. Prabowo, and D. Nuraida, "Analisis pengendalian mutu dalam meningkatkan proses produksi," *J. Fokus Manajemen Bisnis*, vol. 11, no. 2, pp. 173–182, Nov. 2021.
- [13] A. Rajasa and A. R. Fahrudin, "Analysis of the Effect of Tool Material and Spindle Rotation Speed on Cutting Surface Roughness in Turning Aluminum Alloy 6061: Analisa Pengaruh Material Tool dan Kecepatan Putaran Spindle Terhadap Kekasaran Permukaan Pemotongan Pada Pembubutan Aluminium Alloy 6061," *Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Sidoarjo, Indonesia, Preprint*, Agu. 2025.

- [14] H. Akkuş and H. Yaka, "Optimization of Cutting Parameters in Turning of Titanium Alloy (Grade 5) by Analysing Surface Roughness, Tool Wear and Energy Consumption," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 12, Art. no. 565, 2021, doi: 10.1007/s40799-021-00525-6.
- [15] J. D. Kechagias, K.-E. Aslani, N. A. Fountas, N. M. Vaxevanidis, and D. E. Manolakos, "A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy," *Measurement*, vol. 151, Art. no. 107213, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107213