

PENGUJIAN KEKASARAN PERMUKAAN *ROD* BERBAHAN PLA/PCL/HA DENGAN METODE *INJECTION MOLDING* SETELAH MELALUI *MACHINING PROCESS*

*Surya Khaeniko Prasetya¹, Rifky Ismail², Sri Nugroho²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: suryakh21@gmail.com

Abstrak

Pengujian kekasaran permukaan *rod* yang terbuat dari bahan PLA (*Polylactic Acid*), PCL (*Polycaprolactone*), dan HA (*Hydroxyapatite*), yang diproduksi menggunakan metode *injection molding*, kemudian diproses lebih lanjut melalui *machining process*. Rod ini dirancang untuk aplikasi medis, di mana kekasaran permukaan yang halus sangat penting untuk menghindari iritasi atau infeksi. Pengujian kekasaran permukaan dilakukan dengan mengukur nilai Ra (rata-rata aritmetika deviasi profil), yang digunakan untuk menilai kualitas permukaan material. Setelah proses *injection molding*, rod tersebut melalui *machining process* untuk menghasilkan permukaan yang lebih halus. Pengujian dilakukan dengan menggunakan profilometer untuk mengukur nilai Ra. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan parameter pemesinan, seperti kecepatan potong dan kedalaman pemotongan, sangat mempengaruhi nilai Ra. Selain itu, penggunaan parameter pemesinan yang sesuai dengan kecepatan 800 rpm dan *deep of cut* sebesar 0,5 mm menunjukkan bahwa polimer PLA/PCL/HA dapat diproses dengan baik tanpa terjadi lelehan atau patah. Penelitian ini menjelaskan bahwa proses *injection molding* dan pemesinan dapat mempengaruhi kekasaran permukaan pada rod berbahan PLA/PCL/HA, yang sangat relevan untuk aplikasi medis.

Kata kunci : *injection molding*; kekasaran permukaan; *machining process*; rod

Abstract

Surface roughness testing was conducted on rods made from PLA (*Polylactic Acid*), PCL (*Polycaprolactone*), and HA (*Hydroxyapatite*), which were produced using the *injection molding* method and further processed through a *machining process*. These rods are designed for medical applications, where a smooth surface finish is crucial to prevent irritation or infection. Surface roughness was assessed by measuring the Ra value (arithmetic mean deviation of the profile), which is used to evaluate the surface quality of the material. After the *injection molding process*, the rods underwent *machining* to achieve a smoother surface. Testing was performed using a profilometer to measure the Ra value. The results showed that variations in machining parameters, such as cutting speed and depth of cut, significantly affected the Ra value. Additionally, using appropriate machining parameters, with a cutting speed of 800 rpm and a depth of cut of 0.5 mm, demonstrated that the PLA/PCL/HA polymer could be processed effectively without deformation or breakage. This study explains that both the *injection molding* and *machining processes* can influence the surface roughness of PLA/PCL/HA rods, which is highly relevant for medical applications.

Keywords: *injection molding*; machining process; rod; surface roughness

1. Pendahuluan

Ligamen cruciatum anterior (ACL) adalah salah satu dari dua ligamen krusial di dalam sendi lutut yang berfungsi menstabilkan sendi tersebut [1]. Fungsi utama ACL adalah mencegah pergeseran anterior tibia terhadap femur, serta membatasi rotasi internal tibia dan gerakan valgus lutut. Ligamen ini memainkan peran penting dalam menjaga stabilitas dinamis dan koordinasi sendi lutut selama aktivitas fisik. Kehilangan fungsi ACL dapat menyebabkan gangguan fungsi lutut, cedera meniskus, dan perkembangan degenerasi sendi dini [2]. Penanganan cedera ACL dapat bersifat konservatif atau bedah, tergantung pada tingkat keparahan cedera, usia pasien, tingkat aktivitas, dan tujuan fungsional. Rekonstruksi ACL dengan menggunakan graft tendon adalah prosedur umum untuk mengembalikan stabilitas lutut. Rehabilitasi pascaoperasi sangat penting untuk memulihkan fungsi lutut dan mencegah cedera ulang [3]. Kombinasi PLA/PCL/HA digunakan untuk membuat *screw* tulang yang dapat terurai secara hayati, yang penting dalam rekonstruksi ACL. PLA/PCL/HA memiliki kekuatan mekanik yang memadai, laju degradasi yang dapat dikendalikan, dan bioaktivitas yang mendukung penyembuhan tulang [4]. *Injection molding* digunakan untuk memproduksi komponen dengan volume tinggi dari material cair yang disuntikkan ke dalam cetakan [5]. *Machining Process* pada polimer PLA/PCL/HA, dalam pembuatan *rod*, merupakan tahapan penting untuk mendapatkan dimensi presisi dan kualitas permukaan yang diperlukan dalam aplikasi medis. Salah satu tantangan dalam pemesinan polimer PLA/PCL/HA adalah menjaga kestabilan termal selama proses, karena polimer ini memiliki titik leleh yang lebih rendah dibandingkan logam. Pengaturan suhu dan

kecepatan pemotongan yang tepat sangat penting untuk mencegah deformasi atau degradasi material [6]. Pada polimer seperti PLA/PCL/HA, *machining process* seperti pembubutan dapat mempengaruhi kekasaran permukaan. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan profilometer kontak sesuai dengan standar ISO 4287 [7]. Hasil pengukuran ini kemudian dianalisis untuk menentukan parameter kekasaran yang sesuai dengan standar ISO 4287. Untuk nilai Ra yang lebih rendah menunjukkan permukaan yang lebih halus, yang digunakan dalam aplikasi *interference screw* untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan produk.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan biokomposit yang terdiri dari Polylactic Acid (PLA), Polycaprolactone (PCL), dan Hydroxyapatite (HA). Komposisi bahan terdiri dari 85% PLA, 15% PCL, dan 5% HA berdasarkan berat total [8]. Bahan-bahan tersebut dicampur menggunakan metode *chemical blending*, di mana PLA dan PCL dicampurkan dengan pelarut kloroform pada suhu 50°C dan kecepatan 300 rpm selama 30 menit. Setelah campuran homogen tercapai, HA ditambahkan dalam konsentrasi 5% dari total massa campuran dan diaduk selama 1 jam pada suhu 65°C dengan kecepatan 100 rpm untuk memastikan distribusi yang merata [9]. Setelah proses pencampuran selesai, campuran biokomposit PLA/PCL/HA dicetak menggunakan mesin *injection molding* pada suhu 175°C dengan tekanan injeksi 1 bar dan 5 bar untuk membentuk rod yang diinginkan.

Setelah proses *injection molding*, rod yang telah terbentuk kemudian diproses lebih lanjut menggunakan proses pemesinan (*machining process*) untuk menghasilkan permukaan yang lebih halus dan mengurangi kekasaran permukaan. Proses pemesinan dilakukan dengan mesin bubut, dan parameter pemesinan, seperti kecepatan potong dan kedalaman pemotongan, disesuaikan agar tidak terjadi lelehan atau patah pada material [10]. Kecepatan potong yang digunakan adalah 800 rpm dengan kedalaman pemotongan 0,5 mm, yang terbukti efektif untuk menghasilkan permukaan yang halus tanpa merusak struktur polimer.

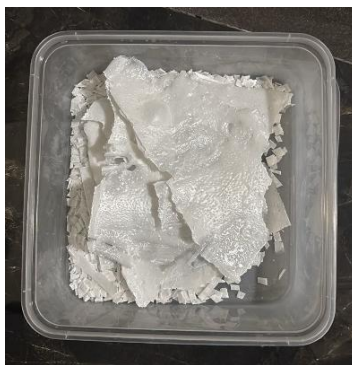
Pengujian kekasaran permukaan dilakukan menggunakan profilometer untuk mengukur nilai Ra (rata-rata aritmetika deviasi profil) dari rod yang telah diproses [11]. Pengukuran Ra dilakukan pada berbagai titik sepanjang permukaan rod untuk memperoleh gambaran yang representatif mengenai kualitas permukaan yang dihasilkan oleh proses *injection molding* dan *machining*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi parameter pemesinan, seperti kecepatan potong dan kedalaman pemotongan, memiliki pengaruh besar terhadap nilai Ra dan kualitas permukaan akhir rod berbahan PLA/PCL/HA yang dicetak dan diproses melalui kedua tahap ini.

3. Hasil dan Pembahasan

Proses pengujian kekasaran permukaan pada rod yang diproduksi oleh *injection molding* perlu melewati proses *machining* agar pengukuran yang dilakukan bisa sesuai dengan hasil yang dibutuhkan dan agar pengujian dapat berjalan sesuai dengan parameter yang diinginkan.

3.1 Fabrikasi rod

Material rod yang dipakai menggunakan bahan PLA (85%), PCL (15%), dan HA (5% dari berat total) yang dicampur dengan metode *chemical blending*. Material dasar berupa *polylacticacid* (PLA), *polycaprolactone* (PCL), dan *hidroksiapatite* (HA) dicampurkan menggunakan metode *chemical blending* dengan tujuan untuk menghasilkan komposit yang merata antara polimer PLA dan PCL dengan partikel HA, sehingga ketiga material dapat tercapur merata antar partikelnya. Proses pencampurannya dilakukan dengan *magnetic stirrer* dan memasukkan bahan bahan secara bertahap. Untuk memudahkan pencampurannya dibutuhkan klofoam sebagai media dari PLA/PCL/HA. Nantinya dari klorofoam tersebut akan menguap dengan sendirinya. Setelah semua bahan tercampur dan menjadi campuran homogen, komposit tersebut dikeringkan di suhu ruangan dan menunggu hingga kering. Seperti ditunjukkan pada Gambar 1 merupakan komposit yang telah kering dan siap digunakan untuk proses *injection molding*.



Gambar 1. Komposit PLA/PCL/HA

Hasil dari komposit nantinya digunakan untuk proses *injection molding*. Setelah komposit tersebut kering proses selanjutnya yaitu melakukan *injection molding* dengan parameter suhu 175° dan dengan tekanan 3 bar. Alat *press* yang digunakan terdapat *nozzel* yang menyambungkan antara *chamber* yang digunakan untuk menuangkan komposit dan *molding* untuk mengisi cairan dari PLA/PCL/HA. Komposit tersebut dilelehkan dengan *heatband* yang langsung mengikat pada *chamber* sehingga nantinya setelah dipanaskan hingga suhu 175° , komposit dapat dimasukkan lalu tunggu hingga meleleh. Setelah itu dilakukan proses penekanan ke dalam *chamber* oleh *plunger* dengan tekanan sebesar 3 bar. Cairan tersebut akan memasuki ke dalam cetakan/*molding* berbentuk *rod* dan tunggu hingga kering untuk dapat membuka cetakan tersebut dan menghasilkan *rod* seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Rod

3.2 Machining Process

Proses pembubutan dilakukan pada *rod* yang terbuat dari material PLA/PCL/HA setelah melalui proses *injection molding*. Pembubutan dilakukan dengan menggunakan mesin bubut yang terdapat pada Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Gambar 3. Menunjukkan proses permesinan/*machining process* berupa pembubutan. Proses machining dengan kecepatan 800 rpm dan kedalaman potong 0,5 mm pada bahan PLA/PCL/HA yang dibuat menggunakan *injection molding* dengan tujuan menghasilkan permukaan yang rata. Pemerataan spesimen tersebut agar nantinya pada proses pengujian kekasaran permukaan dapat dilakukan dengan optimal untuk mengetahui kekasaran permukaan dengan parameter pembubutan yang telah dilakukan.

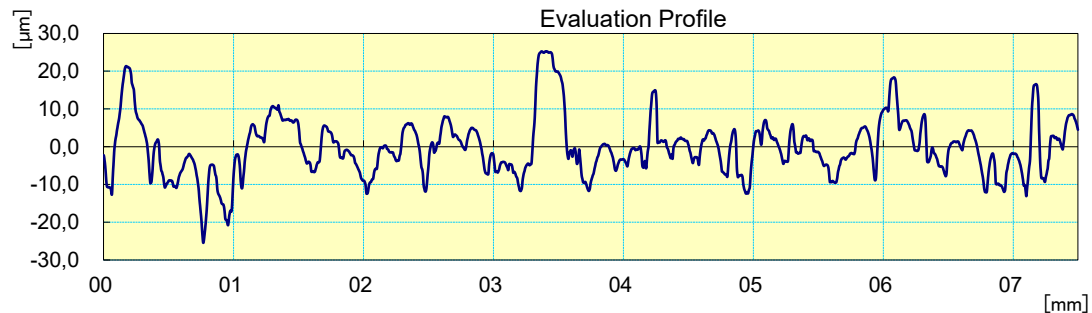


Gambar 3. Machining process (pembubutan)

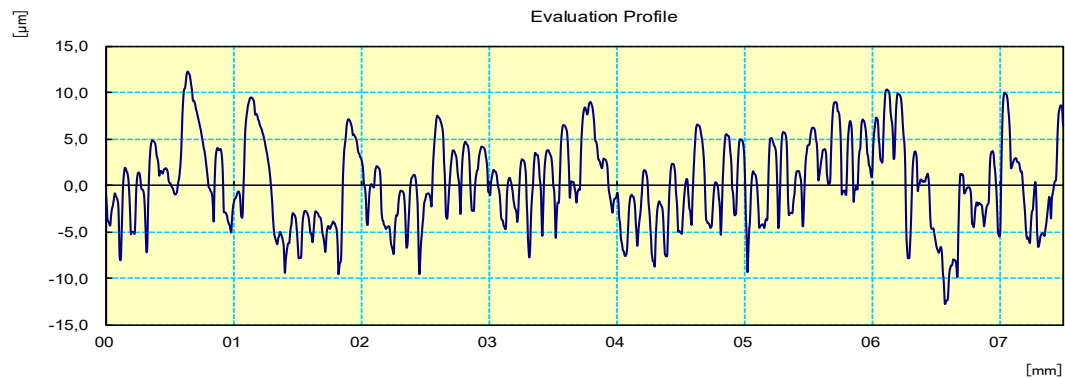
3.3 Pengujian Kekasaran Permukaan

Proses machining dengan kecepatan 800 rpm dan kedalaman potong 0,5 mm pada bahan PLA/PCL/HA yang dibuat menggunakan *injection molding* menghasilkan permukaan dengan kekasaran rata-rata $3.834 \mu\text{m}$. Meskipun material ini termasuk dalam kategori polimer, yang biasanya memiliki kekasaran permukaan lebih tinggi dibandingkan material logam, pengaturan parameter pemesinan yang tepat dapat membantu mengurangi tingkat kekasaran. Hasil kekasaran permukaan yang relatif konsisten menunjukkan bahwa parameter pemesinan yang digunakan, seperti kecepatan 800 rpm dan kedalaman potong 0,5 mm, cukup efektif dalam menghasilkan permukaan yang stabil pada material PLA/PCL/HA. Namun, kekasaran permukaan tetap lebih tinggi dibandingkan dengan material logam yang sering kali menunjukkan kekasaran lebih rendah pada pemesinan dengan parameter yang serupa. Hal ini dapat disebabkan oleh sifat fisik material PLA/PCL/HA, seperti kelembutan dan karakteristik pengikisan yang berbeda dengan logam.

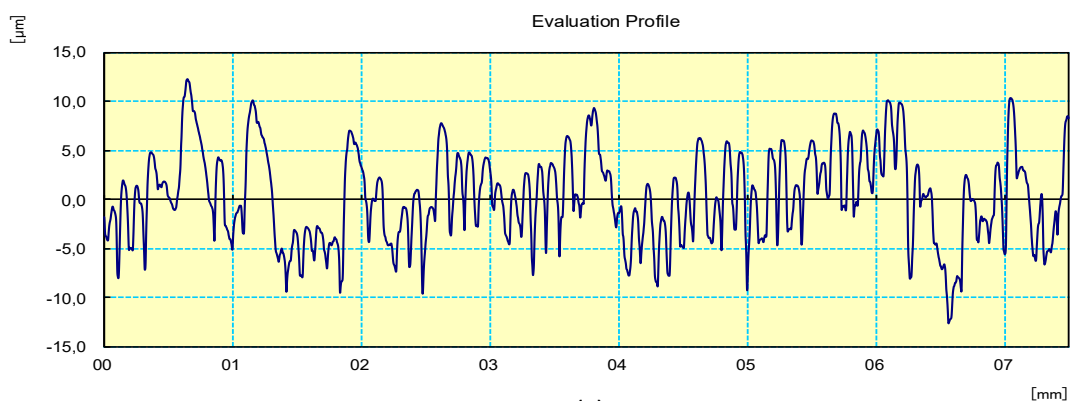
Proses machining dengan kecepatan 800 rpm dan kedalaman potong 0,5 mm pada bahan PLA/PCL/HA yang dibuat menggunakan *injection molding* menghasilkan permukaan dengan kekasaran rata-rata 3.834 μm . Meskipun material ini termasuk dalam kategori polimer, yang biasanya memiliki kekasaran permukaan lebih tinggi dibandingkan material logam, pengaturan parameter pemesinan yang tepat dapat membantu mengurangi tingkat kekasaran. Hasil kekasaran permukaan yang relatif konsisten menunjukkan bahwa parameter pemesinan yang digunakan, seperti kecepatan 800 rpm dan kedalaman potong 0,5 mm, cukup efektif dalam menghasilkan permukaan yang stabil pada material PLA/PCL/HA. Namun, kekasaran permukaan tetap lebih tinggi dibandingkan dengan material logam yang sering kali menunjukkan kekasaran lebih rendah pada pemesinan dengan parameter yang serupa. Hal ini dapat disebabkan oleh sifat fisik material PLA/PCL/HA, seperti kelembutan dan karakteristik pengikisan yang berbeda dengan logam.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Grafik pengukuran kekasaran permukaan (a) Percobaan pertama
(b) Percobaan kedua (c) Percobaan ketiga

Tabel 1. Nilai kekasaran permukaan *rod*

UJI KEKASARAN		Ra
Rod 3	1	3,910 μm
	2	3,814 μm
	3	3,778 μm
	Rata rata	3.834 μm

Perbedaan dalam nilai kekasaran pada Tabel 1. antar pengukuran bisa dipengaruhi oleh permukaan yang tidak rata pada *rod* setelah proses *injection molding*, yang mungkin memerlukan proses finishing tambahan untuk mendapatkan hasil yang lebih halus. Beberapa faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan antara lain pemilihan pahat pemotong yang tepat untuk menghindari pemanasan berlebih, pengaturan kecepatan pemotongan yang dapat mempengaruhi hasil akhir, serta pengontrolan suhu selama proses pemesinan. Untuk meningkatkan kualitas permukaan, penggunaan coolant dan pengoptimalan parameter pemotongan bisa menjadi solusi, selain melakukan proses finishing untuk memperhalus permukaan setelah pembubutan. Gambar 2. Menunjukkan proses pengukuran kekasaran permukaan menggunakan alat Bernama *surface roughness tester*.



Gambar 2. Pengukuran kekasaran permukaan (*Surface Roughness Tester*)

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tentang pengujian kekasaran permukaan I berbahan PLA/PCL/HA yang diproduksi menggunakan metode *injection molding* dan pemrosesan lebih lanjut melalui *machining process*, dapat disimpulkan bahwa proses *machining* dengan kecepatan potong 800 rpm dan kedalaman pemotongan 0,5 mm dapat menghasilkan permukaan yang relatif halus pada bahan PLA/PCL/HA. Pengujian kekasaran permukaan menggunakan profilometer menunjukkan nilai Ra yang cukup rendah, yaitu rata-rata 3.543 μm . Meskipun hasil kekasaran permukaan ini lebih tinggi dibandingkan dengan material logam, parameter pemesinan yang tepat dapat mengurangi kekasaran yang dihasilkan.

Faktor yang mempengaruhi hasil kekasaran antara lain kecepatan pemotongan dan kedalaman pemotongan yang dipilih dengan hati-hati agar tidak merusak material atau menyebabkan deformasi. Penggunaan proses finishing tambahan dan pengaturan suhu yang optimal dapat meningkatkan kualitas permukaan material ini untuk aplikasi medis yang memerlukan permukaan halus, seperti untuk penggunaan dalam komponen interferensi screw dalam prosedur medis. Dengan demikian, penelitian ini memberikan gambaran yang berguna mengenai pengaruh parameter pemesinan terhadap kualitas permukaan rod PLA/PCL/HA yang diproses melalui *injection molding* dan *machining*, yang relevan untuk aplikasi medis.

5. Daftar Pustaka

- [1] Evans, J., Nielson, J. I. and Mabrouk, A. (2023). *Anterior cruciate ligament (ACL) knee injuries*. [online] Nih.gov. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499848/>.
- [2] L.Belozo, F., S.M.N.Belozo, R., Charles Ricardo Lopes, Yamada, A.K. and Vagner R.R. Silva (2024). Anterior cruciate ligament: A brief narrative review of main risk factors for injury and re-injury. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2024.01.022>.
- [3] Mousavibaygei, S., Gerami, M., Haghi, F. and Pelarak, F. (2022). Anterior cruciate ligament (ACL) injuries: A review on the newest reconstruction techniques. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 11(3), p.852. doi:https://doi.org/10.4103/jfmpe.jfmpe_1227_21.

- [4] Jiang, C., Peng, H., Sun, Y., Xu, S., Li, W., Huang, Y., Xiang, D., Fan, X., Zhao, J., He, C. and Song, B. (2024). Comparison of a Novel Modified PLA/HA Bioabsorbable Interference Screw With Conventional PLGA/ β -TCP Screw: Effect on 1-Year Postoperative Tibial Tunnel Widening in a Canine ACLR Model. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 12(10). doi:<https://doi.org/10.1177/23259671241271710>.
- [5] Chen, M., Chen, Y., He, H., Zhou, X. and Chen, N. (2025). Structure and Property Evolution of Microinjection Molded PLA/PCL/Bioactive Glass Composite. *Polymers*, 17(7), p.991. doi:<https://doi.org/10.3390/polym17070991>.
- [6] Plamadiala, I., Croitoru, C., Pop, M.A. and Roata, I.C. (2025). Enhancing Polylactic Acid (PLA) Performance: A Review of Additives in Fused Deposition Modelling (FDM) Filaments. *Polymers*, 17(2), p.191. doi:<https://doi.org/10.3390/polym17020191>.
- [7] Budi Basuki, Ignatius Aris Hendaryanto, Benidiktus Tulung Prayoga and Handoko Handoko (2023). Hubungan Antara Produktifitas Pemesinan dan Kualitas Permukaan Bahan UHMWPE Hasil Bubut Silindris dengan Mesin CNC. *Jurnal engine : energi, manufaktur, dan material*, 7(1), pp.15–15. doi:<https://doi.org/10.30588/jeemm.v7i1.1461>.
- [8] Fariz Wisda Nugraha, Ismail, R., Athanasius Priharyoto Bayuseno, Deni Fajar Fitriyana, Mochammad Ariyanto, Mubarak, M.H. and Ilham Fajar Bagaskara (2024). Influence of Preheat Temperature Variation on Single Screw Extrusion for Characterizing PLA, PCL, and HA Biocomposite Filaments. *E3S Web of Conferences*, 576, pp.06007–06007. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457606007>.
- [9] Ismail, R., Cionita, T., Lai, Y.L., Fitriyana, D.F., Siregar, J.P., Bayuseno, A.P., Nugraha, F.W., Muhamadin, R.C., Irawan, A.P. and Hadi, A.E. (2022). Characterization of PLA/PCL/Green Mussel Shells Hydroxyapatite (HA) Biocomposites Prepared by Chemical Blending Methods. *Materials*, [online] 15(23), p.8641. doi:<https://doi.org/10.3390/ma15238641>.
- [10] Tallal Hakmi, Hammoudi Abderazek, Yusuf Furkan Yapan, Hamdi, A. and Alper Uysal (2025). Enhancing sustainability in CNC turning of POM-C polymer using MQL with vegetable-based lubricant: machine learning and metaheuristic optimization approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-025-15962-5>.
- [11] Ali Payami Golhin, Tonello, R., Jeppe Revall Frisvad, Sotirios Grammatikos and A. Strandlie (2023). Surface roughness of as-printed polymers: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(3-4), pp.987–1043. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-023-11566-z>.