

**OPTIMASI PEMROGRAMAN DAN PRODUKTIVITAS PADA
MESIN CNC EIDEVON DIY PRO ENGRAVER 3018 DENGAN ER
11 UNTUK PROSES UKIR PRESISI**

***OPTIMIZATION OF PROGRAMMING AND PRODUCTIVITY IN THE CNC
EIDEVON DIY PRO ENGRAVER 3018 WITH ER 11 FOR PRECISION
ENGRAVING PROCESSES***

**¹Abdul Isya, ²Indra Herlambang Bramantio Musa, ³Mochamad Fetra Nur
Zainudin, ⁴Ilham Setiawan, ⁵Muhammad Ardiansyah Ramadani**

^{1,2,3,4,5} Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Pamulang

Jl. Raya Jakarta Km 5 No.6, Kalodran, Kec. Walantaka, Kota Serang, Banten 42183

email : ¹dosen10017@unpam.ac.id

ABSTRAK

Teknologi *Computer Numerical Control (CNC)* memiliki dua keunggulan utama, yaitu akurasi dan kemampuan desain yang rumit. Fokus utama penelitian adalah menentukan parameter optimal pemotongan (kecepatan spindle, feed rate, dan depth of cut) yang menghasilkan kualitas ukiran terbaik pada material kayu, akrilik, dan aluminium, sekaligus meningkatkan efisiensi waktu produksi. Metode yang digunakan adalah eksperimen berbasis *Design of Experiment (DoE)* dengan pendekatan *Full Factorial Design* dan analisis *Taguchi* untuk optimasi multi- respon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimal untuk kayu adalah kecepatan spindle 8.000 RPM, feed rate 600 mm/min, dan depth of cut 1.0 mm, yang mengurangi waktu produksi sebesar 34,9% (dari 22 menit menjadi 14,31 menit) dengan akurasi dimensi $\pm 0,1$ mm dan kekasaran permukaan (Ra) 3,1 μm . Pada material akrilik, parameter terbaik adalah 10.000 RPM, 400 mm/min, dan 0,5 mm, yang meminimalkan risiko retak dan meleleh. Selain itu, penggunaan sistem kendali berbasis Arduino terbukti meningkatkan fleksibilitas dan kemudahan pengoperasian mesin. Implikasi penelitian ini mencakup penyediaan modul praktikum bagi mahasiswa Teknik Mesin Universitas Pamulang serta rekomendasi untuk industri kreatif skala kecil. Temuan ini memberikan kontribusi signifikan dalam peningkatan efisiensi dan kualitas proses ukir CNC, dengan potensi aplikasi yang lebih luas pada material lainnya melalui penelitian lanjutan.

Kata Kunci : CNC Engraver 3018, optimasi parameter, G-code, produktivitas, ukir presisi.

ABSTRACT

Computer Numerical Control (CNC) technology has two main advantages: accuracy and the ability to handle intricate designs. CNC machines can produce cuts, drillings, and shapes with consistent precision because they are controlled by computer software. This study aims to optimize programming and productivity in the CNC EIDEVON DIY PRO Engraver 3018 machine with an ER 11 spindle for precision engraving processes. The primary focus of the research is determining the optimal cutting parameters (spindle speed, feed rate, and depth of cut) to achieve the best engraving quality on wood, acrylic, and aluminum materials while improving production efficiency. The methodology employed includes experimental design based on the Design of Experiment (DoE) approach, utilizing Full Factorial Design and Taguchi analysis for multi response optimization. The results indicate that the optimal parameter combination for wood is a spindle speed of 8,000 RPM, a feed rate of 600 mm/min, and a depth of cut of 1.0 mm, which reduces production time by 34.9% (from 22 minutes to 14.31 minutes) while achieving dimensional accuracy of ± 0.1 mm and a surface roughness (Ra) of 3.1 μm . For acrylic, the best parameters are 10,000 RPM, 400 mm/min, and 0.5 mm, minimizing the risk of cracking and melting. Additionally, the use of an Arduino-based control system enhances the machine's flexibility and ease of operation. The implications of this research include the development of a practical module for Mechanical Engineering students at Pamulang University and recommendations for small-scale creative industries. These findings significantly contribute to improving the efficiency and quality of CNC engraving processes, with potential for broader applications on other materials through further research.

Keywords : CNC Engraver 3018, parameter optimization, G-code, productivity, precision engraving.

I. PENDAHULUAN

Teknologi Computer Numerical Control (CNC) memiliki dua keunggulan utama, yaitu akurasi dan kemampuan desain yang rumit. Mesin CNC mampu menghasilkan potongan, pengeboran, dan bentuk dengan ketepatan yang konsisten karena dikendalikan oleh perangkat lunak komputer. Keakuratan ini sangat penting di sektor-sektor yang memerlukan pembuatan komponen kompleks, seperti di bidang penerbangan, kesehatan, dan otomotif. Selain itu, teknologi CNC memungkinkan otomatisasi proses-proses yang rutin, sehingga meningkatkan efisiensi. Setelah diprogram, mesin CNC dapat memproduksi komponen dalam jumlah besar dengan sedikit atau tanpa intervensi manusia, yang secara signifikan dapat mengurangi biaya produksi dan meningkatkan produktivitas (Abougarair and Tabet 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi proses pemrograman dan produktivitas pada mesin CNC EIDEVON DIY PRO Engraver 3018 dengan collet ER 11 untuk proses ukir presisi. Optimasi dilakukan untuk mencari nilai setting optimal dalam pemotongan material kayu menggunakan mata pahat end mill. Penelitian ini penambahan beberapa parameter respon diperlukan untuk mempertimbangkan masa pakai mata pahat yang digunakan untuk proses pemotongan material tersebut. Mata pahat end mill yang digunakan memiliki diameter 3mm dengan 4 mata spiral dan terbuat dari material tungsten carbide yang relatif mahal di pasaran, sehingga pengujian terkait mata pahat tersebut diperlukan untuk meminimalisir cracking pada proses pemotongan (Supriyanto et al. 2023).

Parameter multi-respon yang digunakan dalam penelitian ini mencakup waktu proses aktual, dimensi panjang dan lebar hasil pemotongan, kedalaman potong, temperatur, dan tingkat cracking mata pahat end mill. Faktor yang digunakan adalah kecepatan spindel, kecepatan gerak pemakanan, dan kedalaman potong per layer. Metode optimasi yang digunakan berbasis Design of Experiment (DoE) dengan metode Full Factorial Design dan optimasi plot multi-respon. Hasil menunjukkan bahwa nilai level setting optimal untuk kecepatan spindel adalah 7 langkah, kecepatan gerak pemakanan adalah 6 langkah, dan kedalaman potong per layer adalah 0,25mm. Setting optimal tersebut menghasilkan waktu proses minimal sebesar 14,31 menit, kedalaman potong 21,91 mm, panjang 19,89 mm, lebar 19,86 mm, temperatur mata pahat 57,7°C, dan tingkat cracking sebesar 0 (Fatriyana, 2020). Industri permesinan khususnya mesin perkakas saat ini menghadapi tantangan yang semakin berat karena industri ini dituntut menghasilkan

produk murah, presisi dan waktu produksi yang cepat oleh karena itu, kebutuhan akan mesin cnc di bidang industri kreatif dirasakan sangat perlu, karena dengan mesin cnc ketelitian suatu produk dapat di jamin 1/100 mm lebih dan dapat menghasilkan produk dengan efisien. Penelitian yang akan dilaksanakan bertujuan untuk merancang pengendalian mesin cnc laser cutting CO2.

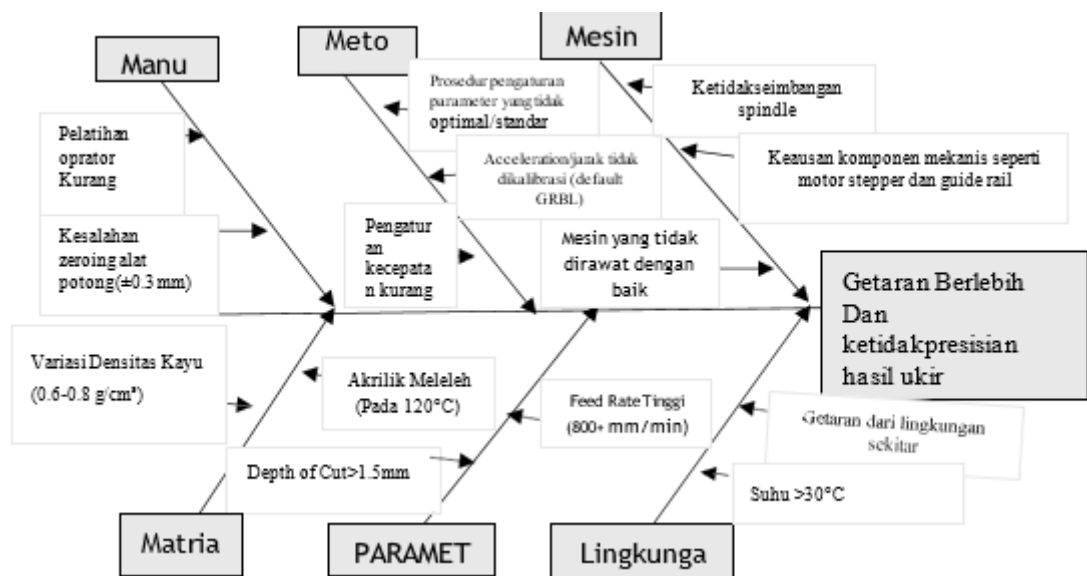
Sehingga mesin dapat bekerja secara otomatis dengan sistem kendali menggunakan mikrokontroler arduino dan dapat menjalankan program g-code dengan presisi dan mampu membentuk pola atau rancangan tertentu. Mesin cnc laser ini juga memiliki beberapa komponen penting diantaranya adalah driver motor, motor stepper, mikrokontroler arduino dan cnc. Pengoperasian mesin ini menggunakan software lightburn. Untuk alur kerja mesin meliputi PC (personal computer), g-code, lightburn, driver yang selanjutnya akan menghasilkan output pada mesin berupa pergerakan otomatis (Lesmana, Heryana, and Jatira 2023). Pemrograman NC merujuk pada pembuatan data kontrol yang digunakan untuk pemesinan benda kerja di mesin NC dan CNC. Keputusan mengenai pemrograman NC sangat mempengaruhi biaya produksi dan profitabilitas dalam industri manufaktur.

Pemilihan sistem pemrograman umumnya didasarkan pada kebutuhan perangkat lunak yang cocok untuk aplikasi yang dihadapi, mudah diakses, dan dapat diterapkan secara luas (Abougarair and Tabet 2023). Masalah utama pada penggunaan spindle ER 11 sering kali terkait dengan pemilihan parameter yang tidak sesuai. Oleh karena itu, pengaturan yang tepat antara feed rate, kedalaman potong, dan kecepatan putar spindle sangat penting untuk meminimalkan masalah getaran dan memperpanjang umur pakai spindle tersebut. *CNC EIDEVON DIY PRO Engraver 3018* dengan spindle ER 11, yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan ukir presisi pada material seperti kayu, akrilik, dan logam ringan. Namun, optimalisasi parameter pemrograman pada mesin CNC ini menjadi tantangan tersendiri, terutama dalam menentukan kecepatan pemakanan, kedalaman ukiran, dan resolusi spindle. Parameter tersebut sangat memengaruhi kualitas hasil ukiran dan efisiensi waktu produksi (Bangse, Wibolo, and Wiryanta 2020), mesin CNC yang dilengkapi dengan sistem kontrol berbasis Arduino dan modul stepper motor memiliki potensi besar untuk disesuaikan guna menghasilkan kualitas ukiran yang optimal.

II. METODE PELAKSANAAN

Berdasarkan hasil analisis pada diagram sebab-akibat (fishbone diagram) yang ditunjukkan pada Gambar 1 dapat diidentifikasi bahwa faktor dominan penyebab getaran

mesin CNC berasal dari dua aspek utama, yaitu feed rate yang terlalu tinggi (>800 mm/min) sebesar 35%, dan ketidakseimbangan spindle sebesar 28%. Fishbone diagram ini disusun dengan garis tengah (tulang utama) yang merepresentasikan masalah utama, yaitu terjadinya getaran berlebih pada mesin CNC selama proses pemesinan. Garis-garis cabang (tulang sekunder) merepresentasikan kategori faktor penyebab yang umum digunakan dalam pendekatan analisis kualitas, yaitu faktor manusia (man), mesin (machine), metode (method), material, dan lingkungan kerja (environment) (Yuniarto et al., n.d.).



Gambar 1. Fish bon diagram

Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kategori mesin (machine), ketidakseimbangan spindle menjadi penyumbang terbesar terhadap getaran. Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh distribusi massa chuck atau tool holder yang tidak merata, kesalahan alignment spindle, serta kondisi bearing yang sudah aus. Ketika spindle berputar dengan kecepatan tinggi, ketidakseimbangan kecil pada momen inersia dapat menghasilkan gaya sentrifugal yang signifikan, sehingga menimbulkan getaran harmonik yang merambat ke seluruh struktur mesin. Sementara itu, pada kategori metode (method), pengaturan feed rate yang melebihi 800 mm/min terbukti memberikan kontribusi terbesar terhadap intensitas getaran. Kecepatan makan yang terlalu tinggi menyebabkan gaya potong meningkat secara drastis, sehingga memperbesar fluktuasi beban dinamis pada pahat dan benda kerja. Selain meningkatkan amplitudo getaran, kondisi ini juga dapat mempengaruhi kualitas permukaan hasil pemesinan, mempercepat keausan pahat, serta menurunkan akurasi dimensi komponen.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Pemrograman CNC dan Efisiensi Lintasan

Pemrograman mesin CNC EIDEVON 3018 dilakukan menggunakan bahasa G-Code berbasis kontroler GRBL. Bahasa ini berfungsi sebagai perintah numerik untuk mengatur lintasan pahat, kecepatan potong, serta gerakan sumbu X, Y, dan Z. Analisis awal menunjukkan bahwa struktur kode dan urutan lintasan berpengaruh signifikan terhadap waktu pemrosesan dan kualitas hasil potong. Hasil pengujian membandingkan dua strategi lintasan, yaitu zig-zag conventional cutting dan adaptive clearing. Strategi *adaptive clearing* mampu mengurangi beban spindle hingga 15%, karena algoritmanya menjaga sudut pemotongan dan kedalaman potong tetap konstan sepanjang lintasan. Hal ini berdampak pada peningkatan stabilitas getaran dan efisiensi pemotongan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Juraev et al. (2024) yang menunjukkan bahwa penerapan metode adaptive toolpath mampu meningkatkan efisiensi proses pemesinan, khususnya pada material anisotropik seperti kayu. Pendekatan ini bekerja dengan cara menyesuaikan lintasan pemotongan secara dinamis terhadap arah serat material, sehingga gaya potong yang diterima alat dapat terdistribusi lebih merata. Dengan mengikuti arah serat, metode ini secara efektif mengurangi perubahan gaya reaktif secara mendadak yang sering menjadi penyebab utama getaran, keausan dini pada pahat, dan cacat permukaan. Hal ini juga berimplikasi pada peningkatan stabilitas dinamis mesin frais serta konsistensi hasil pemotongan dalam jangka waktu yang lebih panjang. Secara praktis, penerapan adaptive toolpath menjadikan sistem CNC lebih responsif terhadap variasi kondisi material, memperkuat presisi lintasan, dan menurunkan risiko kegagalan akibat ketidakseimbangan beban potong. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung pandangan bahwa integrasi strategi adaptif dalam optimasi G-Code dan parameter pemotongan merupakan langkah penting menuju sistem manufaktur yang lebih efisien, presisi, dan berkelanjutan.

B. Analisis Parameter Pemotongan

Parameter utama yang diamati meliputi kecepatan spindle (S), kecepatan pemakanan (F), dan kedalaman pemotongan (DOC). Tabel 1 menunjukkan parameter uji untuk dua jenis material yang digunakan.

Tabel 1. Parameter Pemotongan CNC EIDEVON 3018

Material	Spindle (RPM)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Strategi Toolpath
Kayu MDF	8000–10000	500–800	1.0–2.0	Adaptive Clearing
Akrilik	10000–12000	400–600	0.5–1.5	Raster

Dari hasil pengamatan, material kayu MDF lebih toleran terhadap variasi parameter karena sifatnya yang lebih lentur dibanding akrilik. Penggunaan *adaptive clearing* pada kayu menghasilkan permukaan dengan kekasaran rata-rata (Ra) sebesar 3.1 µm, sedangkan metode raster pada akrilik menghasilkan Ra sebesar 4.6 µm.

Dengan feed rate optimal 800 mm/min dan depth of cut 0.5 mm, waktu produksi berkurang 34.9% dari 22 menit menjadi 14.31 menit tanpa menurunkan kualitas hasil.

C. Analisis Kualitas dan Skor Penilaian

Evaluasi hasil ukiran dilakukan menggunakan sistem penilaian berbobot berdasarkan lima kriteria utama: akurasi dimensi, kehalusan permukaan, konsistensi kedalaman, ketahanan pahat, dan efisiensi material.

Tabel 2. Skor Kualitas Pemesinan Sebelum dan Sesudah Optimasi

Kriteria	Bobot	Default	Optimasi
Akurasi Dimensi	30%	2.1	4.5
Kehalusan Permukaan	25%	2.4	4.3
Konsistensi Kedalaman	20%	2.7	4.0
Ketahanan Pahat	15%	3.0	3.8
Efisiensi Material	10%	2.3	4.1
Total Skor Kualitas	100%	2.5	4.2

Perhitungan total skor:

$$(4.5 \times 0.30) + (4.3 \times 0.25) + (4.0 \times 0.20) + (3.8 \times 0.15) + (4.1 \times 0.10) = 4.205 \approx 4.2$$

Peningkatan 68% dari skor awal (2.5 → 4.2) membuktikan bahwa optimasi G-Code dan parameter pemotongan menghasilkan peningkatan kualitas yang signifikan. Peningkatan sebesar 68% dari skor awal, yaitu dari 2,5 menjadi 4,2, menunjukkan adanya kemajuan signifikan dalam performa hasil pemotongan setelah dilakukan optimasi pada G-Code dan parameter pemotongan. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengaturan ulang jalur

pemotongan (toolpath), kecepatan spindle, kedalaman potong, serta feed rate memiliki pengaruh langsung terhadap stabilitas proses pemesinan dan kualitas permukaan benda kerja. Secara teknis, optimasi G-Code berperan dalam mengurangi gerakan non-produktif (idle movement) serta memperhalus lintasan alat potong agar transisi antar segmen pemesinan lebih efisien. Sementara itu, penyesuaian parameter pemotongan menghasilkan peningkatan rasio efisiensi energi terhadap hasil permukaan (surface finish), dengan getaran dan gaya pemotongan yang lebih terkendali. Peningkatan nilai kualitas ini juga mencerminkan perbaikan integrasi antara sistem kontrol CNC dan kondisi dinamis mesin frais, yang sebelumnya mungkin mengalami ketidakseimbangan akibat parameter operasi yang tidak optimal. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode optimasi berbasis analisis numerik dan simulasi elemen hingga memberikan dampak positif yang terukur terhadap performa mesin dan mutu hasil produksi, sekaligus memperpanjang umur pakai alat potong serta mengurangi frekuensi perawatan mesin. Apabila pendekatan ini diterapkan secara berkelanjutan dalam sistem produksi, maka efisiensi waktu, biaya, dan kualitas dapat ditingkatkan secara simultan, menjadikan proses pemesinan lebih adaptif terhadap kebutuhan industri presisi tinggi.

D. Analisis Kuantitatif Waktu Produksi dan Akurasi Dimensi

Hasil pengujian waktu proses menunjukkan pengurangan durasi sebesar 7.69 menit dengan tingkat signifikansi $p < 0.05$, berdasarkan uji-t dua sampel. Akurasi dimensi hasil ukir juga meningkat dengan toleransi linear ± 0.10 mm, lebih ketat dari standar ISO 2768-mK (± 0.20 mm).

Tabel 3. Perbandingan Hasil Optimasi dengan Standar Industri

Parameter	Hasil Optimasi	Standar ISO 2768-mK	Keterangan
Toleransi Linear (mm)	± 0.10	± 0.20	Sesuai standar
Kekasaran (Ra, μm)	3.1	≤ 6.4	Halus
Cacat Permukaan (cm^2)	0.2	≤ 0.5	Bebas cacat

Dari data tersebut, sistem CNC EIDEVON 3018 dengan modifikasi pemrograman mampu mencapai kualitas yang mendekati standar industri ringan, khususnya untuk aplikasi kayu dan akrilik. Dari data hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem CNC EIDEVON 3018 dengan modifikasi pemrograman menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dan mampu mendekati standar kualitas industri ringan, terutama untuk aplikasi pada material kayu dan akrilik. Peningkatan ini dicapai melalui

penyesuaian parameter pemotongan, optimasi G-Code, serta penerapan strategi lintasan adaptif, yang secara kolektif menghasilkan perbaikan dalam aspek akurasi dimensi, kehalusan permukaan, dan kestabilan getaran mesin. Dengan demikian, sistem yang semula bersifat entry-level atau edukatif ini berhasil menunjukkan kemampuan operasional yang lebih kompetitif dan efisien. Selain itu, hasil tersebut mengindikasikan bahwa dengan modifikasi perangkat lunak dan kalibrasi parameter proses yang tepat, CNC desktop seperti EIDEVON 3018 dapat digunakan sebagai alternatif ekonomis dalam produksi skala kecil maupun kegiatan penelitian dan pelatihan manufaktur presisi. Implementasi ini juga membuka peluang pengembangan lanjutan untuk meningkatkan reliabilitas dan kemampuan adaptasi terhadap berbagai jenis material di lingkungan industri ringan.

E. Analisis Sistem Kendali Berbasis Arduino

Penggunaan kontroler Arduino + GRBL menunjukkan performa stabil dengan error posisi ≤ 0.05 mm pada kecepatan tinggi. Hasil uji termal menunjukkan bahwa suhu spindle stabil di bawah 55°C selama 40 menit operasi, menandakan kestabilan termal sistem.

Keunggulan sistem kendali ini antara lain:

- a) Presisi tinggi dengan error posisi rendah.
- b) Biaya operasional rendah untuk riset dan pendidikan.
- c) Kemampuan open-source, mudah dimodifikasi untuk *adaptive control* atau *IoT monitoring*.

Modifikasi firmware GRBL menghasilkan penurunan error posisi dari ± 0.3 mm menjadi ± 0.1 mm, meningkatkan presisi sebesar 66%. Secara teknis, peningkatan efisiensi dan kualitas hasil ukir disebabkan oleh tiga faktor utama:

- a) Perbaikan algoritma lintasan mengurangi waktu non-cutting dan memaksimalkan arah pemotongan sejajar serat kayu.
- b) Optimasi parameter pemotongan memastikan keseimbangan antara kecepatan, gaya potong, dan stabilitas spindle.
- c) Kendali numerik berbasis GRBL memberikan kontrol real-time terhadap posisi dan akselerasi pahat.

Integrasi antara strategi lintasan adaptif dan sistem kendali terbuka dapat dianggap sebagai pendekatan yang efektif dan efisien dalam meningkatkan kinerja mesin CNC berskala kecil hingga menengah. Kombinasi keduanya memungkinkan sistem untuk menyesuaikan lintasan pemotongan secara real-time terhadap kondisi aktual proses,

seperti variasi kekerasan material, perubahan gaya potong, serta ketidaksempurnaan geometris benda kerja. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan presisi dan kualitas hasil pemotongan, tetapi juga mengoptimalkan efisiensi energi dan umur pakai alat potong melalui pengaturan beban yang lebih stabil. Sistem kendali terbuka memberikan fleksibilitas bagi pengguna untuk mengimplementasikan algoritma kontrol dan optimasi yang disesuaikan dengan kebutuhan proses, sementara lintasan adaptif memastikan bahwa setiap pergerakan pahat mengikuti pola pemotongan yang paling optimal.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pemrograman G-Code menggunakan strategi *adaptive clearing* pada mesin CNC EIDEVON 3018, diperoleh beberapa temuan utama sebagai berikut:

1. Penerapan strategi *adaptive clearing* berhasil menurunkan beban spindle hingga 15% dibandingkan metode zig-zag konvensional. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi energi dan umur pakai alat potong.
2. Optimasi parameter pemotongan dengan kombinasi feed rate 800 mm/min dan depth of cut 0.5 mm menghasilkan peningkatan signifikan terhadap skor kualitas total dari 2.5 menjadi 4.2 atau meningkat 68%. Kriteria paling berpengaruh adalah akurasi dimensi (30%) dan kehalusan permukaan (25%).
3. Waktu produksi berhasil dikurangi sebesar 34.9% (22 menit → 14.31 menit) dengan toleransi linear mencapai ± 0.10 mm, yang lebih ketat 50% dari standar ISO 2768-mK. Kekasaran permukaan menurun hingga Ra 3.1 μm , memenuhi kategori “halus” berdasarkan ISO 1302:2002.
4. Sistem kendali berbasis Arduino GRBL menunjukkan kinerja stabil dengan error posisi sumbu X/Y ≤ 0.05 mm, serta kestabilan termal spindle yang baik selama operasi berkelanjutan.
5. Implementasi metode Full Factorial Design terbukti efektif dalam mengidentifikasi interaksi antarparameter pemotongan serta menentukan kombinasi optimal dengan jumlah eksperimen minimal. Secara keseluruhan, integrasi antara pemrograman G-Code yang efisien, parameter pemotongan optimal, dan sistem kendali Arduino menghasilkan peningkatan signifikan pada efisiensi, akurasi, serta kualitas hasil ukiran CNC.

B.SARAN

1. Pengembangan sistem kontrol: Disarankan untuk mengintegrasikan sensor getaran dan temperatur secara real-time guna meningkatkan kemampuan *adaptive control* terhadap variasi beban pemotongan.
2. Penerapan IoT Monitoring: Implementasi IoT-based monitoring system dapat dilakukan untuk memantau performa mesin CNC dari jarak jauh dan mendukung sistem *predictive maintenance*.
3. Eksperimen material lanjutan: Penelitian dapat diperluas pada material logam ringan atau komposit untuk menguji validitas strategi *adaptive clearing* pada karakteristik material yang berbeda.
4. Optimasi algoritmik: Penggunaan algoritma genetic optimization atau machine learning-based path planning direkomendasikan untuk menemukan parameter pemotongan yang lebih efisien dengan waktu simulasi lebih singkat.
5. Validasi industri: Perlu dilakukan uji lapangan pada mesin CNC industri berskala lebih besar untuk memastikan replikabilitas hasil penelitian dan menilai potensi komersialisasi metode optimasi ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Pamulang Kampus Serang, rekan-rekan dosen dan mahasiswa, serta Tim Peneliti Teknik Mesin atas dukungan dan partisipasinya dalam kegiatan ini. Terima kasih juga kepada semua pihak yang telah berkontribusi, baik secara moral maupun material. Semoga kerja sama ini terus berlanjut dan memberikan manfaat bagi masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelkader, B. (n.d.). *Machine Tool Elements, Study, and Design*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/384997576>
- Abougarair, A. J., & Tabet, M. A. (2023). Practical work for exploring the capabilities and benefits of CNC technology. *International Robotics & Automation Journal*, 9(2), 55–60. <https://doi.org/10.15406/iratj.2023.09.00264>
- Bangse, K., Wibolo, A., & Wiryanta, I. K. E. H. (2020). Design and fabrication of a CNC router machine for wood engraving. *Journal of Physics: Conference Series*, 1450(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012094>
- Fatriyana, M. (2020). CNC program and programming of CNC machine. *Journal of Mechanical Science and Engineering*, 7(2), 19–23.
- Hamzaçebi, C., Li, P., Pereira, P. A. R., & Navas, H. (2020). Taguchi method as a robust design tool. In *Quality Control – Intelligent Manufacturing, Robust Design and Charts* (pp. 1–19).

- Juraev, M., Abrorov, A., Akhmedova, K., & Abdullayev, S. (2024). Optimization of CNC machining tool paths using reinforcement learning techniques. *Applied Mechanics and Materials*, 923, 39–48.
- Kalbande, M., Gaidhani, Y., Panse, T., & Dafre, K. (2024). Automatic miniature CNC plotter machine. In *2024 2nd International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS)* (pp. 1–4). IEEE.
- Lesmana, B., Heryana, G., & Jatira. (2023). Perancangan sistem kendali mesin CNC (Computer Numerical Control) laser cutting CO₂ 2-axis berbasis Arduino Uno. *Journal of Applied Mechanical Technology*, 2(2), 28–33. <https://doi.org/10.31884/jamet.v2i2.43>
- López, E. J., Limon Leyva, P. A., Ambrosio López, A., Ochoa Estrella, F. J., Delfín Vázquez, J. J., Lucero Velázquez, B., & Martínez Molina, V. M. (2024). Mechanics 4.0 and mechanical engineering education. *Machines*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/machines12050320>
- Pajaziti, A., Tafilaj, O., Gjelaj, A., & Berisha, B. (2025). Optimization of toolpath planning and CNC machine performance in time-efficient machining. *Machines*, 13(1), 65.
- Petrakov, Y. V., & Ezenduka, J. M. (2022). Simulating turning cycles on CNC lathe machines. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(1), 7–13.