

Perancangan Mesin Milling untuk Pembuatan Plat Dwikutub pada Teknologi Fuel Cell

Milling Machine Design for Making Bipolar Plates in Fuel Cell Technology

Aldiansyah Putra¹, Vicky Frans Malau¹, Jhonatan Lumbantoruan¹, Iswandi^{1*}

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Medan Area, Medan 20223, Indonesia

*Corresponding author: iswandi@staff.uma.ac.id

Diterima: 12-07-2025

Disetujui: 11-08-2025

Dipublikasikan: 20-08-2025

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Penelitian ini bertujuan merancang sekaligus menguji kinerja mesin mini milling berbasis CNC sebagai solusi milling ringan dengan biaya yang relatif terjangkau. Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis, dimulai dari pemilihan konsep melalui analisis tabel morfologi, kemudian dilanjutkan pada proses manufaktur komponen menggunakan mesin pembubut CNC untuk menjamin presisi dimensi. Setelah itu, dilakukan perakitan komponen utama, antara lain meja aluminium, motor stepper, ulir trapezoidal, spindle motor DC, serta rangka penyangga yang berfungsi menjaga kestabilan struktur. Pengujian difokuskan pada stabilitas gerak sumbu dan tingkat presisi pemotongan material ringan. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa mesin CNC bekerja dalam toleransi yang dapat diterima, cukup stabil, dan presisi untuk aplikasi pemotongan sederhana, sehingga layak dimanfaatkan dalam pendidikan teknik maupun produksi skala kecil dengan efisiensi operasional baik.

Kata Kunci: Mesin CNC, Mini Milling, Perancangan, Manufaktur.

Abstract

This research aims to design and test the performance of a CNC-based mini milling machine as a lightweight milling solution at a relatively affordable cost. The research stage is carried out systematically, starting with the selection of concepts and proceeding through morphological table analysis, followed by the component manufacturing process, which utilizes CNC turning machines to ensure dimensional precision. After that, the main components were assembled, including aluminum tables, stepper motors, trapezoidal threads, DC motor spindles, and support frames that function to maintain structural stability. The tests focus on the stability of axis motion and the precision level of cutting light materials. The test results indicate that the CNC machine operates within acceptable tolerances, is stable enough, and precise for simple cutting applications, making it suitable for use in engineering education and small-scale production, with good operational efficiency.

Keywords: CNC Machine, Mini Milling, Designing, Manufacturing.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi manufaktur mendorong kebutuhan terhadap mesin milling mini berbasis CNC yang efisien, presisi, dan terjangkau. Mesin CNC skala kecil sering digunakan dalam pendidikan dan penelitian untuk memperkuat kapasitas penerapan sistem otomatisasi mekanik secara praktis (kontribusi low-cost mini-CNC dalam pendidikan) (Ayala-Chauvin et al., 2021; Kumar et al., 2022). Proses manufaktur presisi seperti pembubutan, pengeboran, dan perakitan memerlukan pengendalian parameter seperti kecepatan pemotongan, feed rate, dan torsi motor

agar hasil milling tetap dalam batas toleransi desain (Campbell and Jones, 2020; Tung et al., 2021). Komponen utama seperti motor stepper, ulir lead screw, dan struktur rangka aluminium berperan penting dalam kestabilan dan presisi mesin. Desain sistem kontrol tertutup (closed loop) dengan optimasi delay dan kecepatan telah terbukti meningkatkan respon motor dan keandalan gerak pada mesin CNC skala kecil (Das et al., 2024; Krimpenis and Iordanidis, 2023). Namun, hambatan seperti defleksi rangka, keterbatasan torsi, dan osilasi mekanik masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan mesin milling mini. Oleh karena itu, studi perancangan dan uji stabilitas mesin mini milling diperlukan untuk memastikan kinerja stabil, presisi, dan operasional efisien.

Selain itu, penelitian mengenai mesin CNC mini juga memberikan kontribusi penting bagi pengembangan industri kreatif dan UMKM (Dwy et al., 2025). Mesin berbiaya rendah ini mampu memperluas akses terhadap teknologi manufaktur presisi yang sebelumnya hanya dimiliki industri besar (Fauzi et al., 2025). Dengan demikian, keberadaan mesin mini milling berbasis CNC tidak hanya mendukung proses pembelajaran akademik, tetapi juga berpotensi mendorong inovasi produk lokal dengan kualitas kompetitif dan efisiensi tinggi.

2. Metode

Metode penelitian ini diawali dengan penggunaan tabel morfologi sebagai alat konseptual untuk mengeksplorasi alternatif penyambungan, pengemasan, dan penyelesaian akhir metode ini terbukti efektif dalam menghasilkan beragam solusi sub fungsi secara sistematis (Hülagü and Timur, 2024). Tahap manufaktur melibatkan pembubutan menggunakan mesin CNC dengan parameter seperti kecepatan putar dan laju pemakanan dioptimalkan sesuai karakteristik alat potong HSS, berdasarkan model regresi dari penelitian sebelumnya (Basil Abdulwahhab, 2015). Komponen utama (meja kerja aluminium, motor stepper, ulir, spindle, penyangga, rangka) dirakit melalui rangkaian pengukuran, pemotongan, dan perakitan profil strategi yang mencerminkan prinsip desain feed system dinamis pada mesin CNC presisi tinggi. Terakhir, pengujian stabilitas, presisi, dan efisiensi operasional dilakukan untuk memastikan kesesuaian kinerja mesin terhadap toleransi produksi ringan.

3. Hasil dan Pembahasan

Pembuatan dan pemilihan konsep mesin CNC diawali dengan observasi hasil rancangan yang telah disusun oleh perancang. Dari hasil observasi tersebut, diturunkan beberapa alternatif konsep yang dirangkum dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Konsep pembuatan

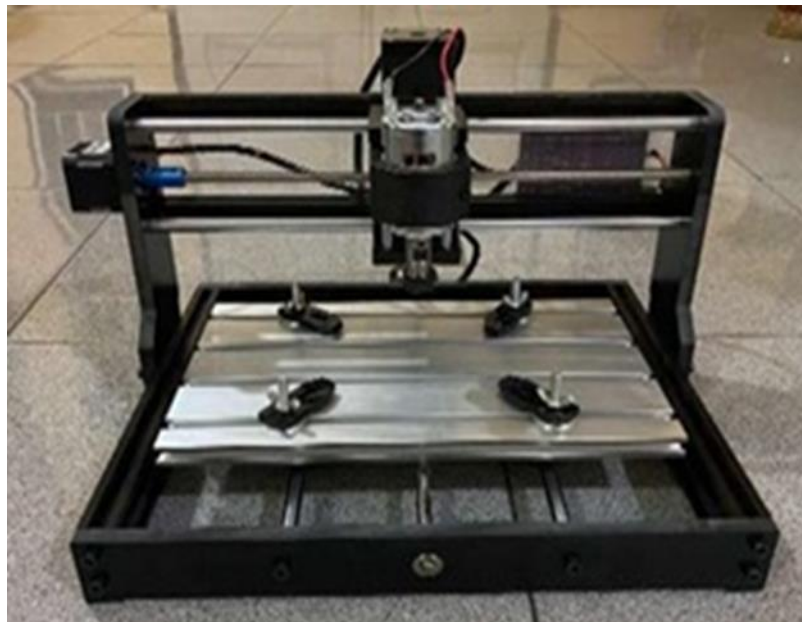
No.	Penyambungan Komponen	Pengemasan Komponen	Penyelesaian Akhir	Kisaran Harga (Rp)	Lama Masa Garansi (bulan)
1	Sambungan las	Kotak kayu	Cat warna	500,000	6
2	Paku keling	Kotak besi	Fernis	800,000	10
3	Sambungan baut	Kotak kardus	Cat clear	300,000	12

Hasil dari tabel morfologi ini menunjukkan bahwa setiap alternatif memiliki keunggulan dan keterbatasan. Sambungan las memberikan kekuatan tinggi tetapi lebih mahal dan sulit untuk dibongkar. Paku keling memberikan daya tahan sedang dengan biaya relatif lebih tinggi karena penggunaan material besi untuk kemasan. Sementara itu, sambungan baut dinilai paling ekonomis dengan harga rendah dan garansi lebih lama, serta memiliki fleksibilitas tinggi dalam proses perakitan dan perawatan. Dengan demikian, konsep sambungan baut dengan

pengemasan kardus dan penyelesaian akhir cat clear dipilih sebagai acuan utama karena lebih efisien secara biaya, mudah diaplikasikan, dan mendukung keberlanjutan pemeliharaan.

Hasil perancangan mesin mini milling dimulai dari penyusunan tabel morfologi yang memuat alternatif metode sambungan, bentuk pengemasan, penyelesaian akhir, kisaran harga, dan masa garansi. Tabel ini menjadi instrumen penting dalam proses konseptual, sebab setiap alternatif berimplikasi langsung pada daya tahan, kepraktisan, serta biaya produksi. Misalnya, pemilihan sambungan menggunakan baut dapat menekan biaya sekaligus memudahkan perawatan, sementara sambungan las lebih kuat tetapi kurang fleksibel. Oleh karena itu, penentuan konsep awal merupakan tahap fundamental yang memengaruhi keberlanjutan proses manufaktur. Konsep yang telah dipilih selanjutnya menjadi dasar untuk proses pembubutan dan perakitan pada mesin CNC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

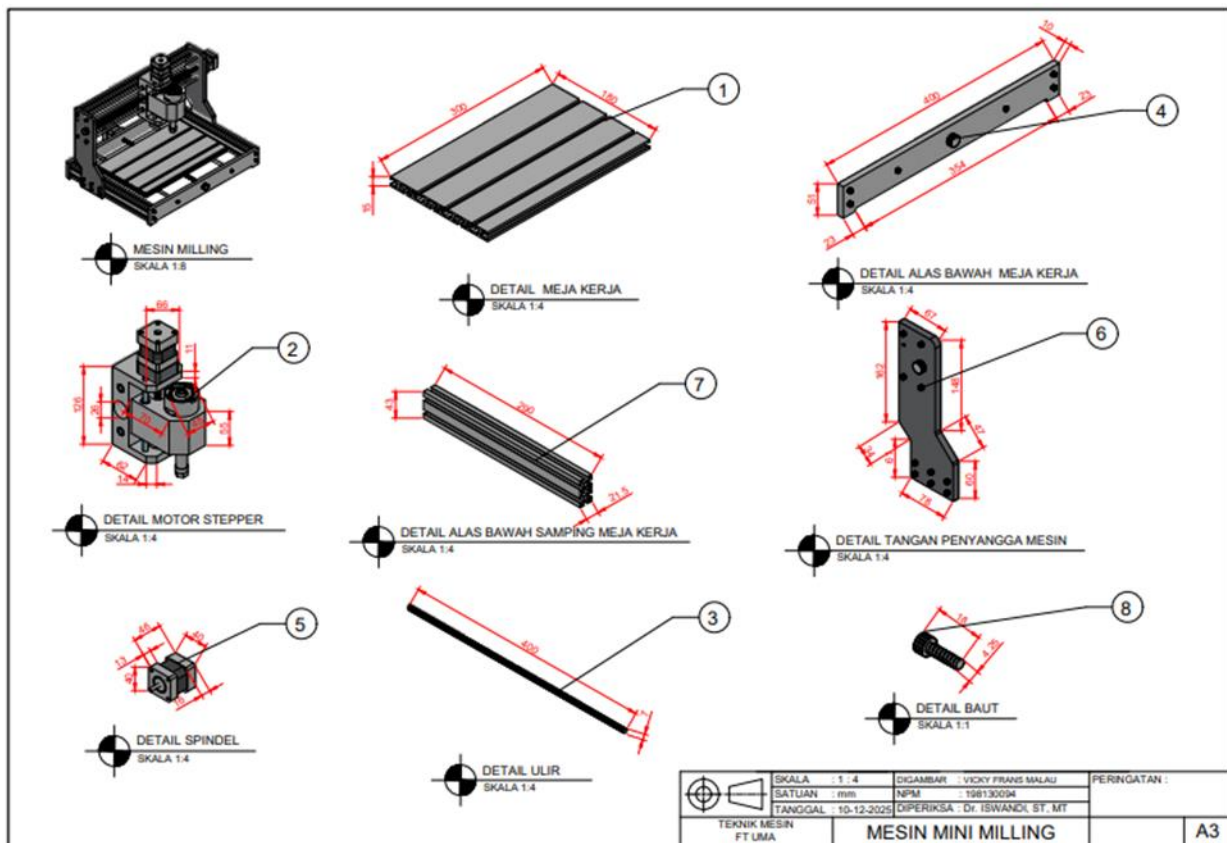
Mesin CNC dipilih karena sifatnya yang sederhana, fleksibel, dan sesuai untuk pekerjaan ringan. Proses pembubutan dilakukan dengan metode silindris, datar, berulir, dan profil. Keempat metode ini digunakan untuk membentuk komponen dengan ukuran presisi sesuai rancangan (Gambar 2). Setiap metode memerlukan perlengkapan chuck yang berbeda, misalnya chuck tiga jari untuk pekerjaan umum, chuck empat jari untuk komponen tak simetris, serta chuck khusus untuk profil tertentu. Mata pahat HSS dipilih karena mampu mempertahankan kekerasan pada suhu tinggi, sehingga mendukung efisiensi pemotongan. Perhitungan kecepatan putar, laju pemakanan, serta kedalaman potong menunjukkan bahwa proses dapat dilaksanakan secara terukur. Contohnya, reduksi diameter spindle motor mount dari 65 mm menjadi 52 mm dilakukan dalam tujuh pass dengan total waktu 14,1 menit. Hasil ini membuktikan bahwa mesin CNC mampu menghasilkan pemesinan yang stabil dan konsisten. Komponen utama mesin berfungsi sebagai fondasi dalam menjaga integritas struktur.



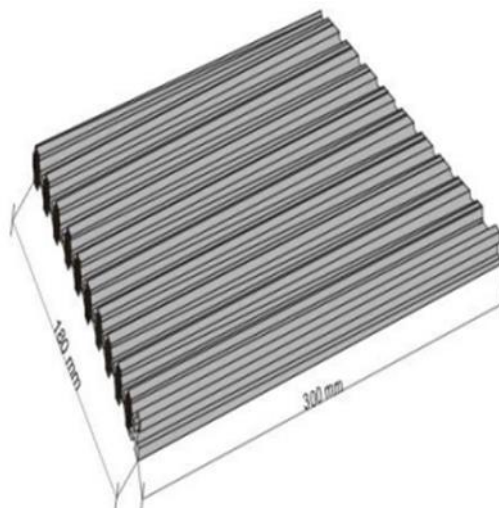
Gambar 1. Mesin Mini Milling

Pembuatan meja kerja aluminium berukuran 300×180 mm (Gambar 3) dilakukan melalui tahapan pengukuran, penandaan titik pemotongan, proses pemotongan, serta perakitan profil. Aluminium dipilih karena ringan namun cukup kaku. Berdasarkan perhitungan, meja kerja memiliki volume 1.080 cm^3 dan berat 2,9 kg, yang memberikan kestabilan optimal untuk pemotongan ringan. Uji pemotongan menunjukkan bahwa meja mampu menopang beban pemesinan tanpa mengalami deformasi berarti. Motor stepper NEMA 17/23 dipasang pada sumbu X, Y, dan Z untuk menggerakkan meja kerja dengan presisi. Motor ini bekerja dalam

langkah kecil sehingga memungkinkan pengendalian posisi yang sangat akurat. Gerakan linier ini diperkuat oleh ulir trapezoidal T8, yang memiliki efisiensi tinggi dan tahan terhadap keausan.



Gambar 2. Komponen utama Mesin Mini Milling



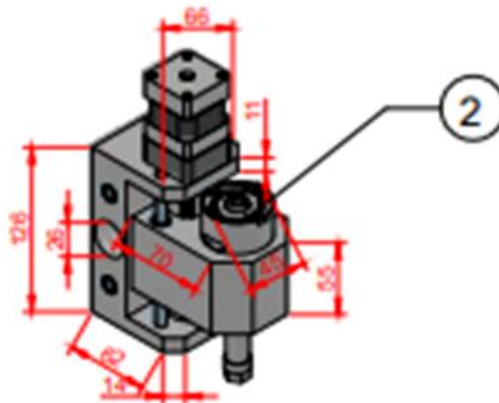
Gambar 3. Meja Kerja Mesin CNC

Untuk memastikan stabilitas rangka, digunakan alas bawah meja kerja dan penyangga sumbu X. Analisis defleksi menunjukkan bahwa batang baja $\varnothing 10$ mm memiliki defleksi 10–20 μm saat diberi beban 10 N, masih dalam batas toleransi milling ringan. Peningkatan ke batang $\varnothing 12$ mm menurunkan defleksi hingga 3–4 μm , sehingga kinerja mesin lebih stabil. Pada sistem pemotongan, spindle motor DC tipe 775 dipakai karena mampu berputar antara 10.000–20.000 rpm. Putaran ini cukup tinggi untuk material lunak seperti aluminium dan kayu, dengan syarat feed rate diatur agar torsi motor tetap terjaga.

Selain spindle, pergerakan sumbu pada mesin CNC sangat dipengaruhi oleh motor stepper. Motor stepper tipe NEMA 17 atau NEMA 23, yang dikendalikan driver A4988 atau DRV8825, berfungsi menggerakkan sumbu X, Y, dan Z dengan presisi tinggi. Kemampuan motor stepper dalam menghasilkan torsi konstan pada kecepatan rendah menjadikannya ideal untuk sistem CNC berskala ringan hingga menengah (Gambar 4). Proses pembuatan motor stepper diawali dari desain CAD rotor, stator, poros, housing, dan gulungan kumparan. Stator dibuat dari lembaran baja silikon laminasi, rotor dari magnet permanen neodmium, dan perakitan dilakukan dengan pemasangan bearing untuk memastikan rotasi halus. Tahap penyolderan dan kalibrasi melengkapi proses ini, sehingga motor mampu menghasilkan gerakan linier yang presisi pada pemotongan ringan.

Seluruh struktur mesin kemudian dirakit dengan dudukan rangka CNC menggunakan profil aluminium dan brucket sudut. Proses perakitan memperhatikan posisi sejajar dan kestabilan struktur agar getaran mesin dapat diminimalkan. Untuk pengikat utama digunakan baut M5 baja ringan, yang memiliki pitch 0,8 mm. Perhitungan kecepatan potong menunjukkan nilai 1910 rpm untuk baja ringan, sehingga baut dapat diproses dengan akurasi yang baik. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa mesin CNC apat dioptimalkan untuk pekerjaan milling ringan dengan mempertahankan stabilitas dan presisi.

Analisis defleksi juga memperlihatkan bahwa batang baja $\varnothing 10$ mm memiliki defleksi rata-rata sekitar $15\ \mu\text{m}$ ketika dibebani 10 N, sedangkan batang $\varnothing 12$ mm hanya mengalami defleksi sekitar $3,5\ \mu\text{m}$. Hal ini membuktikan bahwa peningkatan diameter batang mampu mengurangi defleksi secara signifikan, sehingga meningkatkan kestabilan rangka mesin CNC. Perbandingan ini divisualisasikan pada Gambar 11, yang menunjukkan perbedaan defleksi antara batang $\varnothing 10$ dan $\varnothing 12$. Grafik tersebut menegaskan bahwa peningkatan ukuran batang sangat efektif dalam memperkuat struktur dan menjaga akurasi pemotongan.



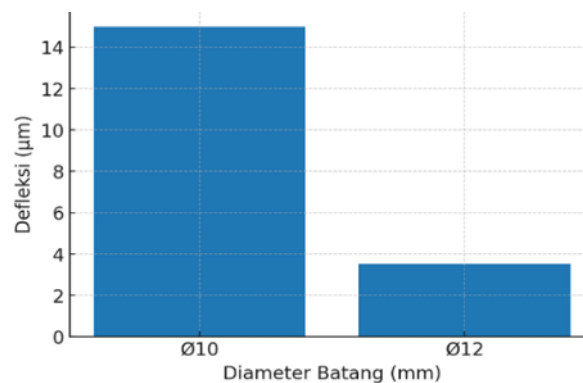
Gambar 3. Motor Stepper

Analisis defleksi rangka memperlihatkan bahwa batang baja $\varnothing 10$ mm memiliki defleksi rata-rata sekitar $15\ \mu\text{m}$ ketika dibebani 10 N, sedangkan batang $\varnothing 12$ mm hanya mengalami defleksi sekitar $3,5\ \mu\text{m}$. Perbedaan ini menunjukkan bahwa peningkatan diameter batang secara signifikan mampu mengurangi defleksi, sehingga memperkuat struktur rangka dan menjaga akurasi mesin. Hasil tersebut divisualisasikan pada Gambar 4, yang menegaskan bahwa batang dengan diameter lebih besar memberikan kestabilan lebih baik pada proses milling ringan. Grafik ini sekaligus membuktikan bahwa pemilihan material dan dimensi rangka menjadi faktor penting dalam menjaga presisi pemotongan.

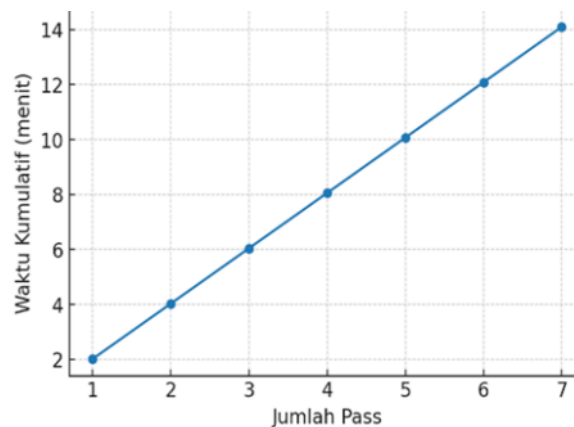
Selain itu, uji pemotongan spindle motor mount dengan reduksi diameter dari 65 mm menjadi 52 mm dilakukan dalam tujuh pass dengan kedalaman potong 2 mm setiap pass. Waktu

rata-rata setiap pass sekitar 2 menit, sehingga total waktu pemotongan mencapai 14,1 menit. Hubungan linier antara jumlah pass dan waktu kumulatif ditampilkan pada Gambar 5, yang menunjukkan kenaikan waktu seiring penambahan jumlah pass. Pola ini menggambarkan bahwa strategi pemotongan bertahap tidak hanya menjaga kualitas permukaan, tetapi juga mengurangi beban pada spindle motor DC tipe 775 agar torsi tetap stabil.

Dengan demikian, Gambar 4 dan Gambar 5 saling melengkapi dalam menjelaskan performa mesin CNC. Grafik defleksi menegaskan pentingnya penguatan struktur rangka, sedangkan grafik waktu pemotongan menunjukkan perencanaan strategi pemesian yang efisien. Keduanya memberikan dasar kuat bahwa stabilitas mekanik dan efisiensi operasional dapat dicapai melalui kombinasi desain rangka yang optimal dan pengendalian proses pemotongan yang tepat.



Gambar 4. Perbandingan uji defleksi batang



Gambar 5. Jumlah pass versus waktu pemotongan spindle motor mount

4. Kesimpulan

Metode penelitian melibatkan analisis konseptual, pemilihan material aluminium dan baja ringan, serta pengujian performa struktural dan pemotongan. Proses manufaktur dilakukan dengan memperhatikan parameter pemesian, perakitan sambungan baut, serta integrasi motor stepper, ulir trapezoidal, dan spindle motor DC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sambungan baut memberikan fleksibilitas perawatan, sementara pemilihan material aluminium dan baja ringan mendukung kekakuan struktur. Analisis defleksi membuktikan bahwa batang Ø12 mm lebih stabil dibanding Ø10 mm dengan penurunan defleksi hingga 75%. Uji pemotongan spindle motor mount juga memperlihatkan hubungan linier jumlah pass terhadap waktu pemesian, dengan total 14,1 menit untuk reduksi 13 mm. Motor stepper NEMA dan spindle motor DC tipe 775 terbukti mampu menjaga presisi dan stabilitas pemotongan pada milling ringan. Secara keseluruhan, mesin CNC hasil rancangan dapat dioptimalkan untuk

aplikasi pendidikan teknik dan produksi sederhana. Mesin ini terbukti stabil, presisi, efisien, dan mudah dirakit, sehingga relevan sebagai solusi teknologi tepat guna di bidang manufaktur skala kecil. Penelitian berikutnya disarankan mengeksplorasi peningkatan kapasitas mesin CNC mini melalui integrasi sensor IoT, analisis getaran, dan optimasi pemotongan material keras guna meningkatkan presisi, efisiensi energi, serta ketahanan struktur jangka panjang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area yang telah memberikan dukungan fasilitas laboratorium dalam proses penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa yang berkontribusi dalam proses perakitan dan pengujian mesin CNC. Selain itu, penulis menghargai dukungan moral dari keluarga dan pihak mitra industri yang membantu dalam penyediaan material serta komponen pendukung. Dukungan tersebut sangat berarti dalam menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ayala-Chauvin, M., F. Saá, R. Rodríguez, C. Domènech-Mestres, and G. Riba-Sanmartí. 2021. "Design and Construction of a Low Cost CNC Milling Machine for Woodworking." In *Proceedings*, 379–90. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8_29.
- Abdulwahhab, Basil A. 2015. "A Study of the Effect of (Cutting Speed, Feed Rate and Depth of Cut) on Surface Roughness in the Milling Machining." *Engineering and Technology Journal* 33: 1785–97. <https://doi.org/10.30684/etj.2015.108823>.
- Campbell, T., and J. F. X. Jones. 2020. "Design and Implementation of a Low Cost, Modular, Adaptable and Open-Source XYZ Positioning System for Neurophysiology." *HardwareX* 7: e00098. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00098>.
- Das, U. C., N. B. Shaik, P. Suanpang, R. C. Nath, K. M. Mantrala, W. Benjapolakul, M. Gupta, C. Somthawinpongsai, A. Nanthaamornphong, and others. 2024. "Development of Automatic CNC Machine with Versatile Applications in Art, Design, and Engineering." *Array* 24: 100369. <https://doi.org/10.1016/j.array.2024.100369>.
- Dwy, S., T. Hermanto, I. Iswandi, and D. Darianto. 2025. "Analisis Kinerja Mesin Peniris Bawang untuk Industri Makanan Skala Kecil." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 4: 59–68. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i1.199>.
- Fauzi, R., I. Iswandi, and T. Hermanto. 2025. "Pengembangan Prototipe Alat Panen Sawit Bertenaga Listrik untuk Meningkatkan Produktivitas." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 4: 76–86. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i1.179>.
- Hülagü, R., and Ş. Timur. 2024. "Using Morphological Chart for Analysing Existing Designs." *Archives of Design Research* 37: 27–41. <https://doi.org/10.15187/adr.2024.02.37.1.27>.
- Krimpenis, A. A., and D. M. Iordanidis. 2023. "Design and Analysis of a Desktop Multi-Axis Hybrid Milling-Filament Extrusion CNC Machine Tool for Non-Metallic Materials." *Machines* 11: 637. <https://doi.org/10.3390/machines11060637>.
- Kumar, J., S. Singh, S. Tripathi, V. Shukla, and S. Pathak. 2022. "Design and Fabrication of 3-Axis CNC Milling Machine Using Additive Manufacturing." *Materials Today: Proceedings* 68: 2443–51. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.145>.
- Tung, T. T., N. X. Quynh, and T. V. Minh. 2021. "Development and Implementation of a Mini CNC Milling Machine." *Acta Marisiensis. Seria Technologica* 18: 24–28. <https://doi.org/10.2478/amset-2021-0014>.