

## Pemodelan dan Simulasi Proses Pembuatan Mold Kompleks dengan Menggunakan Mesin CNC Milling

Amir<sup>1\*</sup>, Afif Hakim<sup>2</sup>, Roban<sup>3</sup>, Muchammad Chusnan Aprianto<sup>4</sup>, Purnama Imam Luthfi<sup>5</sup>, Randi Ahmad Fauzan<sup>6</sup>, M. Rahmantio Septiana<sup>7</sup>, Riyan Maulana<sup>8</sup>,

<sup>1,5,6,7,8</sup>Prodi Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Buana Perjuangan Karawang Jl. H.S. Ronggowaluyo, Teluk Jambe, Karawang Kec. Teluk Jambe Timur - Kab. Karawang - Provinsi. Jawa Barat, 41361

<sup>2,3</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Buana Perjuangan Karawang Jl. H.S. Ronggowaluyo, Teluk Jambe, Karawang Kec. Teluk Jambe Timur - Kab. Karawang - Provinsi. Jawa Barat, 41361

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Islam DR KHEZ Muttaqien - Jl. Syekh Baing Yusuf, Babakancikao, Kab. Purwakarta, Provinsi Jawa Barat 41151

\*Corresponding author. [amir@ubpkarawang.ac.id](mailto:amir@ubpkarawang.ac.id)

### Abstract

*This research aims to model and simulate the process of making complex molds using CNC machines milling machine, with a focus on improving production precision and efficiency. Mold manufacturing planning includes product design, material selection, manufacturing method, cost and time estimation, and vendor selection. Research Experimental research was conducted by manipulating cutting parameters such as cutting speed, depth of cut, and feed rate, as well as machining strategies such as cutting sequence and machining strategies such as cutting sequence and cutting direction. Data was collected through direct observation, interviews, and measurement of product dimensions using inspection tools such as digital calipers and digital height gauges. The results showed that most of the molded product dimensions met set tolerances, except for one dimension that showed deviation. Further analysis is needed to identify the factors causing deviations and optimize machining parameters and strategies to improve the precision and efficiency of complex mold production using CNC machining milling machine.*

**Keywords:** mold kompleks, CNC Milling, Efisiensi, Presisi, Parameter Pemotongan

### Abstrak

Makalah Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mensimulasikan proses pembuatan mold kompleks menggunakan mesin CNC milling, dengan fokus pada peningkatan presisi dan efisiensi produksi. Perencanaan pembuatan mold meliputi desain produk, pemilihan material, metode pembuatan, estimasi biaya dan waktu, serta pemilihan vendor. Penelitian eksperimental dilakukan dengan memanipulasi parameter pemotongan seperti kecepatan potong, kedalaman pemotongan, dan laju pemakanan, serta strategi pemesinan seperti urutan pemotongan dan arah pemotongan. Data dikumpulkan melalui observasi langsung, wawancara, dan pengukuran dimensi produk menggunakan alat inspeksi seperti kaliper digital dan height gauge digital. Hasil penelitian menunjukkan sebagian besar dimensi produk mold memenuhi toleransi yang ditetapkan, kecuali satu dimensi yang menunjukkan penyimpangan. Analisis lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab penyimpangan dan mengoptimalkan parameter serta strategi pemesinan untuk meningkatkan presisi dan efisiensi produksi mold kompleks menggunakan mesin CNC milling.

**Kata kunci:** mold kompleks, CNC Milling, Efisiensi, Presisi, Parameter Pemotongan

### 1. Pendahuluan

Mesin CNC (Computer Numerical Control) milling telah menjadi teknologi utama dalam industri manufaktur modern untuk memproduksi komponen dengan tingkat presisi dan kompleksitas yang

tinggi [1]. Proses CNC milling merupakan salah satu metode pemesinan yang umum digunakan dalam industri untuk menghasilkan produk dengan toleransi yang ketat dan permukaan yang berkualitas [2]. CNC (Computer Numerical Control)

milling adalah teknologi manufaktur yang menggunakan komputer untuk mengontrol mesin penggilingan dalam memproduksi komponen dengan presisi tinggi. Salah satu aplikasi penting dari mesin CNC milling adalah produksi cetakan (mold) yang digunakan dalam berbagai proses manufaktur, seperti injection molding, die casting, dan stamping [3]. Mold (cetakan) merupakan salah satu produk penting dari teknologi CNC milling, digunakan dalam berbagai industri seperti otomotif, elektronik, dan peralatan rumah tangga untuk mencetak komponen dari bahan seperti plastik, logam, atau keramik. Penggunaan CNC milling untuk memproduksi mold memiliki beberapa keunggulan, seperti kemampuan untuk menghasilkan bentuk yang kompleks dengan presisi tinggi, konsistensi dalam produksi massal, serta pengurangan waktu dan biaya produksi. Namun, ada tantangan signifikan dalam mengoptimalkan proses ini, termasuk memastikan presisi dan efisiensi yang tinggi agar hasil akhirnya sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan [1], [4].

Cetakan yang dihasilkan oleh mesin CNC milling harus memiliki tingkat presisi dan kehalusan permukaan yang tinggi untuk memastikan kualitas produk akhir yang dihasilkan. Namun, ada beberapa tantangan yang harus dihadapi dalam mengoptimalkan tingkat presisi dan efisiensi produksi cetakan menggunakan mesin CNC milling yaitu Mesin CNC milling dapat mengalami kesalahan geometri, seperti ketidaklurusan sumbu, kesalahan posisi, dan kesalahan kinematik. Kompensasi kesalahan ini melalui teknik pengukuran dan penyesuaian yang tepat dapat meningkatkan presisi produk akhir. Parameter pemotongan, seperti kecepatan putaran spindle, kecepatan pemakanan, dan kedalaman pemotongan, memiliki pengaruh besar pada kualitas permukaan, waktu siklus, dan umur pahat. Optimalisasi parameter ini melalui pendekatan eksperimental atau simulasi dapat meningkatkan efisiensi dan presisi

produksi [3], [5], [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter pemrosesan pada penggilingan CNC yang mempengaruhi kekasaran permukaan dan energi pemotongan dalam mengidentifikasi faktor-faktor utama yang mempengaruhi tingkat presisi dan efisiensi produksi, seperti parameter pemotongan, strategi pemesinan, kondisi pahat, dan karakteristik bahan baku [7]. Melalui eksperimen dan memvalidasi kinerja mesin CNC milling dalam pembuatan mold dengan fokus pada presisi tinggi [8]. Penelitian ini akan menguji model atau metode optimalisasi yang dikembangkan, serta menganalisis pengaruhnya terhadap kualitas permukaan, waktu siklus produksi, dan umur pahat. Penelitian ini juga bertujuan untuk melakukan investigasi dalam mengurangi konsumsi energi percepatan spindle pada peralatan mesin dan mengembangkan strategi pemesinan yang optimal, termasuk arah pemesinan, kedalaman pemotongan, dan pola lintasan pahat, untuk meningkatkan presisi dan mengurangi waktu siklus produksi [9].

Teori Strategi Pemesinan yang digunakan dalam proses CNC milling, seperti arah pemesinan, kedalaman pemotongan, dan pola lintasan pahat, memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas permukaan dan efisiensi produksi. Teori-teori terkait strategi pemesinan, seperti pemodelan geometri, optimalisasi lintasan pahat, dan simulasi proses pemesinan, dapat digunakan untuk mengembangkan strategi pemesinan yang optimal [10]. Teori Pemantauan dan Kompensasi Keausan Pahat dapat memengaruhi kualitas permukaan dan presisi komponen yang diproduksi. Teori-teori terkait pemantauan kondisi pahat secara real-time dan kompensasi keausan melalui penyesuaian parameter pemotongan atau penggantian pahat dapat digunakan untuk mempertahankan tingkat presisi yang diinginkan [11].

## 2. Metode Penelitian

Perencanaan Pembuatan Mold (Cetakan) Perencanaan yang baik untuk pembuatan mold (cetakan) sangat krusial untuk memastikan hasil akhir berkualitas, efisiensi waktu, dan penggunaan biaya optimal. Berikut beberapa langkah yang perlu diperhatikan dalam perencanaan pembuatan mold:

### 2.1 Desain Produk

Pembuatan desain produk mold untuk tray assy rotor menggunakan material aluminium dan dimensi tray assy rotor adalah 200 mm x 150 mm x 50 mm, dengan bentuk silinder berongga di bagian tengah berdiameter 80 mm. Standar dimensi cavity memiliki kelonggaran (clearance) 0,03 mm dari dimensi produk akhir. Cavity didesain dengan dimensi 201 mm x 151 mm x 51 mm, dengan lubang silinder berdiameter 81 mm di bagian tengah. Kemudian, desain core dibuat untuk membentuk bagian dalam atau lubang pada produk akhir core dengan dimensi silinder berdiameter 80 mm untuk membentuk lubang di bagian tengah produk. Selanjutnya, desain sistem saluran (runner system) yang terdiri dari sprue, runner, dan gate untuk mengalirkan material cair ke dalam cavity, sprue didesain dengan diameter 10 mm, runner dengan dimensi 8 mm x 8 mm, dan gate dengan lebar 5 mm. Pemodelan menggunakan software AutoCad seperti SolidWorks dilakukan untuk membangun model 3D lengkap dari semua komponen mold seperti cavity, core dan sistem saluran sesuai dengan desain yang telah dibuat.

### 2.2 Pemilihan Material Model

Penggunaan material aluminium dalam pembuatan mold memiliki sejumlah keuntungan yang signifikan. Aluminium bersifat ringan namun memiliki konduktivitas termal yang baik, memungkinkan proses pendinginan mold yang cepat dan efisien. Materialnya tahan terhadap korosi dan oksidasi, sehingga mold dari aluminium memiliki umur pakai yang

lebih panjang. Selain itu, aluminium relatif lunak dan mudah dikerjakan dengan proses permesinan, memfasilitasi pembuatan desain mold yang kompleks. Dibandingkan dengan baja atau besi cor, aluminium juga lebih murah serta dapat didaur ulang dengan mudah. Meskipun kekuatannya lebih rendah, aluminium tetap menjadi pilihan optimal untuk pembuatan mold dengan beban sedang atau ringan karena keunggulan-keunggulan tersebut

### 2.3 Pemilihan Metode Pembuatan

Metode pemesinan CNC (Computer Numerical Control) milling merupakan salah satu pilihan utama dalam pembuatan mold kompleks seperti mold tray assy rotor. Proses ini melibatkan penggunaan mesin milling yang dikendalikan secara numerik oleh program komputer untuk memotong dan membentuk material aluminium sesuai desain CAD/CAM. Metode ini mampu menghasilkan geometri kompleks dengan toleransi dimensi yang sangat ketat hingga rentang mikrometer. Kecepatan dan efisiensi produksi juga menjadi keunggulan utama, terutama untuk skala sedang atau besar.

### 2.4 Pemilihan Alat dan Bahan

Pada Gambar 1. Alat dan bahan proses pembuatan mold mesin CNC, arbor atau holder mengacu pada komponen yang digunakan untuk menahan atau memegang alat pemotong (cutting tool) seperti bor, endmill, atau pisau frais. Arbor merupakan poros atau sumbu yang dipasang pada spindel mesin CNC dan berfungsi untuk memegang alat pemotong dengan kuat sehingga dapat berputar pada kecepatan tinggi saat proses pemesinan berlangsung. Sementara itu, holder adalah tempat atau cekaman yang mengunci alat pemotong pada arbor, menjaga agar alat pemotong tidak terlepas saat berputar dan memastikan konsentrisitas serta keakuratan pemotongan. Pemilihan arbor atau holder yang tepat dengan spesifikasi

yang sesuai sangat penting untuk mendapatkan hasil pengerjaan yang presisi dan meningkatkan umur pakai alat pemotong. Beberapa jenis holder yang umum digunakan antara lain collet chuck, hydraulic chuck, dan shrink-fit holder.



Gambar 1. Alat dan bahan proses pembuatan mold

## 2.5 Dokumentasi

- Dokumentasi lengkap: Siapkan dokumentasi lengkap yang dibutuhkan untuk pembuatan mold, termasuk desain 2D/3D CAD, spesifikasi material, dan spesifikasi finishing.
- Komunikasi dengan vendor: Jalin komunikasi yang baik dengan vendor untuk memastikan pemahaman yang sama terhadap desain dan spesifikasi mold.

## 2.6 Gambar Desain Mold

Desain mold ini dirancang dengan presisi tinggi untuk menghasilkan produk berkualitas sesuai spesifikasi. Gambar 2 menunjukkan desain mold atau cetakan untuk produk Assy Rotor. Mold ini dirancang dengan presisi tinggi menggunakan perangkat lunak Autocad untuk memastikan kualitas produk akhir yang sesuai dengan spesifikasi. Pada gambar bagian kiri, terlihat pandangan tampak belakang dari desain mold Assy Rotor. Gambar ini menunjukkan geometri dan detail pada bagian depan mold, seperti lubang di bagian tengah dan fitur-fitur lainnya yang akan membentuk produk Assy Rotor pada proses pencetakan atau pengecoran. Gambar bagian kanan menampilkan pandangan tampak depan dari desain mold yang sama. Pada tampak

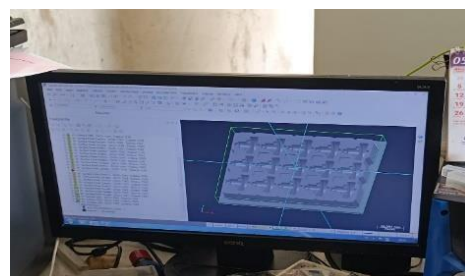
depan, terlihat lebih jelas detail geometri mold, seperti kedalaman lubang di bagian tengah, alur-alur, dan tonjolan-tonjolan yang akan membentuk fitur-fitur pada produk akhir. Kedua gambar tersebut memberikan visualisasi lengkap dari desain mold Assy Rotor dari sudut pandang yang berbeda. Dengan desain yang presisi ini, mold dapat diproduksi menggunakan mesin CNC (Computer Numerical Control) milling dengan akurasi tinggi untuk menghasilkan produk Assy Rotor yang sesuai dengan spesifikasi geometri, dimensi, dan toleransi yang diinginkan.



Gambar 2. menunjukkan simulasi desain mold tray

## 2.7 Checking Product

Tray atau cetakan nampan pada perangkat lunak Master CAM. Master CAM adalah salah satu perangkat lunak CAM (Computer-Aided Manufacturing) yang digunakan untuk memprogram mesin CNC dalam pembuatan mold atau cetakan.



Gambar 3. Simulasi desain mold tray pada master CAM

Pada gambar 3 tersebut, terlihat desain 3D dari mold tray yang akan dibuat menggunakan mesin CNC milling. Desain 3D ini memberikan visualisasi bentuk akhir dari produk cetakan nampan yang diinginkan. Selain itu, gambar juga menunjukkan adanya informasi toleransi

sebesar 0.03. Toleransi ini mengacu pada rentang penyimpangan dimensi yang diizinkan pada produk akhir mold tray dari ukuran nominalnya. Toleransi 0.03 berarti bahwa dimensi aktual pada produk akhir harus berada dalam rentang  $\pm 0.03$  dari ukuran nominal yang ditetapkan pada desain. Dalam proses pembuatan mold kompleks menggunakan mesin CNC milling, toleransi merupakan salah satu parameter penting yang harus diperhatikan untuk mencapai tingkat presisi yang diinginkan. Semakin kecil nilai toleransi, semakin tinggi tingkat presisi yang

### 3 Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Penelitian

Tabel 1 menampilkan hasil pengukuran presisi pada berbagai dimensi geometris produk mold yang diproduksi menggunakan mesin CNC milling. Terdapat 11 dimensi yang diukur dengan ukuranstandar yang harus dipenuhi. Pengukuran dilakukan menggunakan alat inspeksi seperti kaliper digital, height gauge digital, dan alat lainnya. Untuk setiap dimensi, dilakukan 3 kali pengukuran dan dicatat hasilnya. Kolom Min dan Max menunjukkan nilai minimum dan maksimum dari ketiga hasil pengukuran, sedangkan kolom "Ukuran Rata-rata" menampilkan nilai rata-ratanya. Kolom "Keterangan" memberikan informasi apakah hasil pengukuran berada dalam toleransi yang ditetapkan atau di luar toleransi. Dari hasil pengukuran, dimensi nomor 1 dengan ukuran standar 186 mm menunjukkan hasil pengukuran 188,91 mm, yang berada di luar batas toleransi maksimum. Namun, dimensi nomor 2 hingga 11 berada dalam rentang toleransi yang ditetapkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar dimensi produk mold memenuhi toleransi yang ditetapkan, kecuali dimensi nomor 1 yang menunjukkan penyimpangan dari ukuran.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran presisi pada berbagai dimensi

geometris dari produk mold yang dihasilkan menggunakan mesin CNC milling. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan berbagai alat inspeksi seperti kaliper digital, height gauge digital, dan lain-lain.

Tabel 1. Hasil Pengukuran

N0.	Ukurans tandar	Alat inspeksi	Kode alat	Hasil Ukur			Min	Max	Ket
				1	2	3			
1	186	Dig. Kaliper	V-77	188,91	188,91	188,91	188,91	188,91	NG
2	147,7	Dig. Kaliper	V-77	147,12	147,56	147,57	14,56	174,57	Ok
3	111,5	Dig. Kaliper	V-77	111,38	111,37	111,37	111,37	111,38	Ok
4	100 05	Dig. Kaliper	V-77	100,02	100,03	100,03	100,02	100,09	Ok
5	105	Dig. Kaliper	V-77	104,88	104,87	104,87	104,87	104,88	Ok
6	117,5	Dig. Kaliper	V-77	117,46	117,46	117,46	117,46	117,46	Ok
7	43,3	Dig. Kaliper	V-77	43,34	43,37	43,32	43,32	43,37	Ok
8	25,3	Dig. Kaliper	V-77	25,23	25,24	25,27	25,23	25,24	Ok
9	11,5	Dig. Heigh gauge	288	11,45	11,44	11,46	11,44	11,46	Ok
10	12	Dig. Kaliper	V-77	12,04	12,05	12,04	12,04	12,05	Ok
11	5	Dig. Kaliper	V-77	4,99	5,01	4,99	4,99	5,01	Ok

Dari hasil pengukuran pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa sebagian besar dimensi geometris produk mold berada dalam rentang toleransi yang ditetapkan, kecuali untuk dimensi nomor 1 dengan ukuran standar 186 mm. Dimensi ini menunjukkan hasil pengukuran 188,91 mm, yang berada di luar batas toleransi maksimum.

Penyimpangan dimensi pada nomor 1 ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti kesalahan geometri pada mesin CNC milling, parameter pemotongan yang tidak optimal, keausan pahat, atau faktor-faktor lain yang mempengaruhi akurasi proses pemesinan.

Untuk dimensi-dimensi lainnya yang berada dalam rentang toleransi, hasil ini menunjukkan bahwa strategi pemesinan

dan parameter pemotongan yang digunakan dalam penelitian ini cukup efektif untuk menghasilkan produk mold dengan presisi yang baik.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil memodelkan dan mensimulasikan proses pembuatan mold kompleks menggunakan mesin CNC milling dengan tujuan utama meningkatkan presisi dan efisiensi produksi. Melalui pendekatan eksperimental dengan memanipulasi parameter pemotongan seperti kecepatan potong, kedalaman pemotongan, dan laju pemakanan, serta strategi pemesinan seperti urutan dan arah pemotongan, diperoleh hasil yang menggembirakan. Mayoritas dimensi geometris pada produk mold yang dihasilkan memenuhi toleransi yang ditetapkan, menunjukkan kombinasi parameter dan strategi pemesinan yang efektif untuk menghasilkan produk dengan presisi yang baik. Namun, terdapat satu dimensi yang menunjukkan penyimpangan dari ukuran standar, yang kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor seperti kesalahan geometri mesin, parameter pemotongan yang kurang optimal, keausan pahat, atau faktor lain yang mempengaruhi akurasi proses pemesinan. Temuan ini mengindikasikan perlunya analisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi akar penyebab penyimpangan dimensi tersebut serta mengoptimalkan parameter dan strategi pemesinan agar dapat meningkatkan presisi dan efisiensi produksi mold kompleks secara keseluruhan. Penelitian ini memberikan wawasan berharga dalam upaya mengoptimalkan proses pembuatan mold kompleks menggunakan mesin CNC milling guna mencapai tingkat presisi dan efisiensi yang lebih tinggi, sesuai dengan tuntutan industri manufaktur modern.

#### Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi dalam penelitian ini. Kami juga berterima kasih kepada PT Mitra Mandiri

Jaya Teknik yang telah mengizinkan dan memfasilitasi penelitian ini di fasilitas mereka di Kawasan Jababeka 2, Cikarang. Terima kasih atas dukungan dalam menyediakan mesin CNC milling 3 aksis, perangkat lunak AutoCAD, serta peralatan penunjang lainnya yang dibutuhkan. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada para teknisi dan operator mesin yang telah membantu pelaksanaan eksperimen dan pengumpulan data dengan memberikan masukan dan saran yang berharga. Akhir kata, kami berterima kasih kepada semua pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam menyelesaikan penelitian ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan kemajuan industri manufaktur.

#### Referensi

- [1] A. Amiruddin and S. Lubis, "Effectiveness of CNC Turning and CNC Milling in Machining Process," *International Journal of Economic, Technology and Social Sciences*, vol. 2, pp. 575–583
- [2] Y. Lee, A. Resiga, S. Yi, and C. Wern, "The Optimization of Machining Parameters for Milling Operations by Using the Nelder-Mead Simplex Method," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 4, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.3390/jmmp4030066.
- [3] Y. Shneur, "Reconfigurable machine tool: CNC machine for milling, grinding and polishing," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2018, pp. 221–227. doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.114.
- [4] A. N. M. Amanullah, Murshiduzzaman, T. Saleh, and R. Khan, "Design and Development of a Hybrid Machine Combining Rapid Prototyping and CNC Milling Operation," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 163–170. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.081.

- [5] D. F. Hesser and B. Markert, "Tool wear monitoring of a retrofitted CNC milling machine using artificial neural networks," *Manuf Lett*, vol. 19, pp. 1–4, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.mfglet.2018.11.001.
- [6] C. H. Chu, H. Y. Chen, and C. H. Chang, "Continuity-preserving tool path generation for minimizing machining errors in five-axis CNC flank milling of ruled surfaces," *J Manuf Syst*, vol. 55, pp. 171–178, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.03.004.
- [7] "Kekasaran dan Energi Pemotongan pada Penggilangan CNC Material Al-7075."
- [8] D. Susanto and I. Haristian Atmadja, "MESA (Teknik Mesin, Teknik Elektro, Teknik Sipil, Teknik Arsitektur) Analisis Kinerja Mesin CNC Milling Three Axis pada Pembuatan Pipa Jet oil," vol. 8, pp. 22–30.
- [9] S. Jia *et al.*, "Multi-objective parameter optimization of CNC plane milling for sustainable manufacturing," *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-24908-3.
- [10] K. Xu and Y. Li, "Region based five-axis tool path generation for freeform surface machining via image representation," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 57, pp. 230–240, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2018.12.006.
- [11] B. Cuka and D. W. Kim, "Fuzzy logic based tool condition monitoring for end-milling," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 47, pp. 22–36, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2016.12.009.
- [12] H. Taherdoost, "What are Different Research Approaches? Comprehensive Review of Qualitative, Quantitative, and Mixed Method Research, Their Applications, Types, and Limitations," *Journal of Management Science & Engineering Research*, vol. 5, no. 1, pp. 53–63, Apr. 2022, doi:10.30564/jmsr.v5i1.4538.
- [13] S. L. Z. M. and E. O. Gary Rassel, "Research Methods for Public Administrators," *Seventh edition*, vol. 52, no. 1, pp. 12–507, 2021.
- [14] A. F. V. Pedroso *et al.*, "A Comprehensive Review on the Conventional and Non-Conventional Machining and Tool-Wear Mechanisms of INCONEL®," *Metals*, vol. 13, no. 3. MDPI, Mar. 01, 2023. doi: 10.3390/met13030585.
- [15] E. C. Ufomba and S. W. Gadzama, "Manufacturing technique advances in tool and die production," 2022, doi: 10.21203/rs.3.rs-1246895/v1.
- [16] S. Vigneshwaran, K. M. John, R. Deepak Joel Johnson, M. Uthayakumar, V. Arumugaprabu, and S. T. Kumaran, "Conventional and unconventional machining performance of natural fibre-reinforced polymer composites: A review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 40, no. 15–16, pp. 553–567, Aug. 2021, doi: 10.1177/0731684420958103.
- [17] W. Y. Wang, J. Li, W. Liu, and Z.-K. Liu, "Integrated Computational Materials Engineering for Advanced Materials: A Brief Review," 2018.
- [18] P. Chatterjee, S. Mondal, S. Boral, A. Banerjee, and S. Chakraborty, "A novel hybrid method for non-traditional machining process selection using factor relationship and multi-attribute border approximation method," *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 439–

- 456, 2017, doi:  
10.22190/FUME170508024C.
- [19] A. R. C. T. Mason Ma, “Integration of discrete-event dynamics and machining dynamics for machine tool: modeling, analysis and algorithms,” *Manufacturing Letters*, vol. 35, no. 321–332, pp. 1–12, 2023.