

PREDIKSI PERILAKU DINAMIK STRUKTUR MESIN MICRO-MILLING BERBASIS MATERIAL STEEL-POLYMER CONCRETE DENGAN VARIASI PENGUAT TEGAK LURUS DAN DIAGONAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Zafira Nooranisa Ayu¹, Achmad Widodo², Rusnaldy²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

E-mail: zafiraichaa8@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku dinamik struktur mesin micro-milling berbasis material steel-polymer concrete dengan variasi penguat tegak lurus dan diagonal menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method - FEM). Struktur mesin micro-milling membutuhkan karakteristik dinamis yang optimal untuk menghasilkan kualitas produk yang tinggi dengan presisi dan ketelitian maksimal, serta meredam getaran yang terjadi selama proses pemesinan. Simulasi dilakukan menggunakan software ANSYS untuk memperoleh nilai frekuensi pribadi, modus getar, dan rasio redaman pada dua variasi penguatan struktur, yaitu tegak lurus dan diagonal. Simulasi dilakukan dalam dua kondisi batas, yaitu fixed support dan free boundary condition. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi penguat tegak lurus memiliki kekakuan lebih tinggi, ditunjukkan dengan nilai frekuensi pribadi yang lebih tinggi pada modus tertentu dan deformasi yang lebih rendah dibandingkan variasi diagonal. Analisis harmonic response juga menunjukkan bahwa variasi tegak lurus memiliki performa redaman yang lebih baik, dengan rasio redaman lebih kecil pada frekuensi rendah dibandingkan variasi diagonal. Berdasarkan hasil analisis, variasi penguat tegak lurus direkomendasikan sebagai struktur penguat yang lebih baik untuk meningkatkan kestabilan dan akurasi proses manufaktur pada mesin micro-milling.

Kata kunci: frekuensi pribadi; metode elemen hingga; micro-milling; modus getar; rasio redaman;

Abstract

This study aims to analyze the dynamic behavior of micro-milling machine structures based on steel-polymer concrete materials with variations of vertical and diagonal reinforcements using the Finite Element Method (FEM). Micro-milling machine structures require optimal dynamic characteristics to produce high-quality products with maximum precision and accuracy, as well as to dampen vibrations that occur during the machining process. Simulations were carried out using ANSYS software to obtain natural frequencies, vibration modes, and damping ratios for two structural reinforcement variations: vertical and diagonal. Simulations were conducted under two boundary conditions: fixed support and free boundary conditions. Simulation results show that the vertical reinforcement variation has higher stiffness, indicated by higher natural frequency values in certain modes and lower deformation compared to the diagonal variation. Harmonic response analysis also indicates that vertical reinforcement exhibits better damping performance, with smaller damping ratios at low frequencies compared to diagonal reinforcement. Based on the analysis results, vertical reinforcement variation is recommended as a better structural reinforcement to improve stability and accuracy in the manufacturing process of micro-milling machines.

Keywords: damping ratio; finite element method; micro-milling; natural frequency; vibration mode

1. Pendahuluan

Mesin micro-milling adalah alat yang dirancang untuk melakukan proses manufaktur material berskala mikro. Proses permesinan ini menghilangkan material dengan ketelitian, dan presisi tinggi menggunakan pahat potong berukuran mikro yang berputar dengan kecepatan tinggi. Proses ini menyebabkan terjadinya getaran pada mesin yang dapat dianalisis untuk pengoptimalan desain mesin micromilling [1]. Penggunaan mesin micro-milling untuk manufaktur industri sangat luas seperti industri medis, otomotif, elektronik, dan penerbangan. Hal tersebut menyebabkan pengembangan dari mesin micro-milling sangat dibutuhkan. Seperti pengoptimalan bahan, desain, dan lain-lain [2]. Material yang umum digunakan pada mesin micro-milling adalah grey cast iron. Material ini memiliki kemampuan mesin serta pengecoran yang baik, dan dimensi cetakan yang stabil. Grey cast iron juga unggul untuk meredam getaran yang dihasilkan dari gesekan internal material yang tinggi, menjadikan material ini sangat baik untuk menjadi bahan rangka mesin micro-milling. Namun,

material ini menyebabkan bobot mesin sangat berat [3]. Tingginya kebutuhan manufaktur yang memerlukan mesin micro-milling untuk proses produksi ketelitian tinggi menyebabkan mesin dengan getaran minim dan memiliki material yang lebih ringan dari grey cast iron. Polymer concrete memiliki keunggulan dibandingkan dengan bahan konvensional karena dinilai lebih mudah dalam produksi, mampu menahan redaman tinggi, kuat menahan bobot yang berat, dan juga material yang relatif ringan menurut banyak penelitian. Polymer concrete juga memiliki kekuatan tekan yang lebih kecil daripada bahan lain, tapi dengan menggunakan penguat baja untuk meningkatkan kekakuan struktur mesin [4]. Pengembangan dari mesin micro-milling memerlukan analisis perilaku dinamis dari struktur mesin sebagai pengoptimalkan desain, struktur, dan juga bahan. Analisis 2 yang dilakukan untuk mengetahui perilaku dinamik menggunakan software FEM agar dapat menganalisis dynamic properties pada kerangka mesin micro-milling, hal ini menjadi solusi dari pengembangan mesin micro-milling [5]. Proposal penelitian ini dirancang untuk menganalisis perilaku dinamik yang terjadi pada struktur mesin micro-milling dengan material steel-polymer concrete. Analisis yang dilakukan menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui frekuensi pribadi, modus getar, dan rasio redaman yang terjadi pada mesin micro-milling.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method - FEM), Metode Elemen Hingga (Finite Element Method - FEM) merupakan alat numerik yang sangat kuat dan banyak digunakan dalam berbagai bidang teknik untuk menyelesaikan masalah-masalah kompleks. Dalam konteks penelitian ini, FEM sangat relevan karena kemampuannya yang serbaguna dan aplikatif dalam berbagai jenis analisis, seperti analisis struktur, perpindahan panas, dinamika fluida, hingga elektromagnetik. Kelebihan ini menjadikan FEM sangat cocok untuk diterapkan dalam proyek penelitian yang membutuhkan analisis struktur dengan geometri kompleks dan perilaku dinamis yang sulit dianalisis secara analitik [6][7], FEM memberikan akurasi yang bagus dalam simulasi [8], yang sangat penting untuk penelitian yang menuntut hasil yang presisi terutama untuk mengevaluasi karakteristik dinamis mesin micro-milling dengan material steel-polymer concrete. Peneliti dapat melakukan studi parametrik untuk mengoptimalkan desain dan memprediksi perilaku sistem dalam berbagai kondisi[9][10]. Studi literatur dilakukan terlebih dahulu untuk memahami konsep dasar dan hasil penelitian sebelumnya yang relevan, meliputi jurnal ilmiah, buku teks, dan artikel penelitian. Data sifat mekanik material yang digunakan seperti modulus elastisitas, rasio Poisson, densitas, dan parameter damping diperoleh dari literatur yang relevan. Pemodelan struktur dilakukan dengan software desain CAD dan diimpor ke software ANSYS untuk simulasi lebih lanjut. Dalam tahap ini, struktur didiskretisasi melalui proses meshing. Simulasi dinamis dilakukan dengan menggunakan fitur modal analysis dan harmonic response pada ANSYS untuk memperoleh frekuensi pribadi, modus getar, dan rasio redaman struktur. Variasi penguat struktur tegak lurus dan diagonal diuji dalam dua kondisi batas, yaitu fixed support dan free boundary condition. Data hasil simulasi selanjutnya dianalisis untuk menghasilkan grafik Frequency Response Function (FRF) dan menghitung rasio redaman menggunakan metode half power. Hasil simulasi divalidasi dengan membandingkan hasil penelitian sebelumnya untuk memastikan akurasi dari model simulasi yang telah dibuat.

3. Hasil dan Pembahasan

Untuk memahami lebih jauh perilaku dinamik struktur mesin micro-milling berbasis material steel-polymer concrete, penelitian ini memfokuskan analisis pada parameter frekuensi pribadi, khususnya pada modus ke-5 dan ke-6. Pemilihan kedua modus ini didasarkan pada sensitivitasnya terhadap respon dinamis mesin selama beroperasi, yang secara langsung memengaruhi stabilitas dan akurasi proses pemesinan. Frekuensi pribadi merupakan indikator penting yang merepresentasikan seberapa besar kekakuan struktur dalam menahan getaran pada kondisi tertentu. Semakin tinggi nilai frekuensi pribadi yang dicapai, semakin baik kemampuan struktur dalam menahan deformasi akibat beban dinamis.

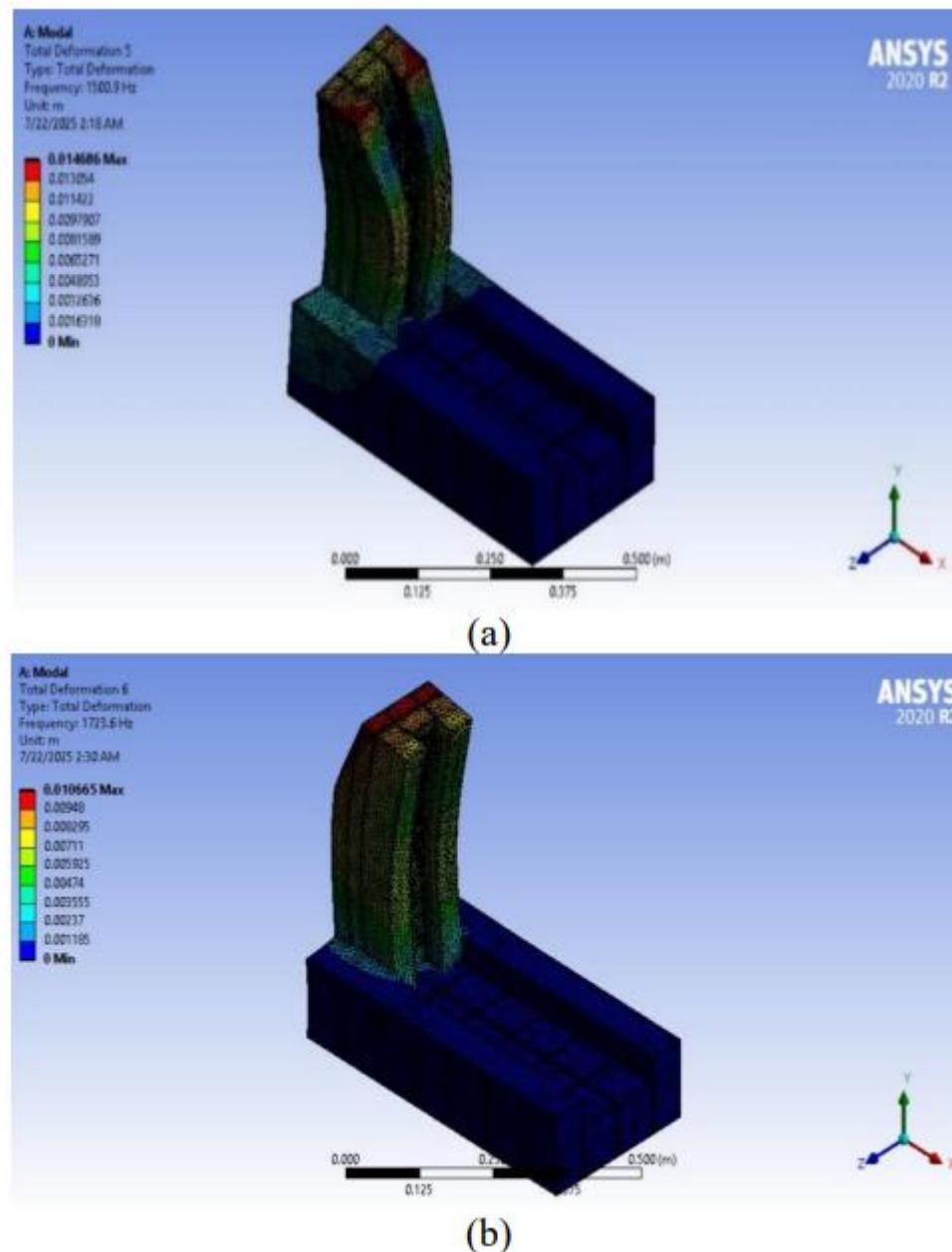
Simulasi dilakukan untuk dua variasi desain struktur, yaitu dengan penguat tegak lurus dan penguat diagonal, pada konfigurasi bed dan column. Tujuannya adalah untuk mengetahui variasi mana yang memberikan respons dinamis yang lebih optimal. Hasil frekuensi pribadi pada masing-masing variasi struktur untuk modus ke-5 dan ke-6 disajikan pada Tabel 1 di bawah ini. Data ini menjadi dasar dalam mengevaluasi performa kekakuan dan efektivitas peredaman dari masing-masing konfigurasi desain.

Tabel 1. Frekuensi Pribadi Hasil Simulasi *Free Boundary Condition*

Modus	Frekuensi Pribadi (Hz)	
	Simulasi bed dan column variasi tegak lurus	Simulasi bed dan column variasi diagonal
5	1500,9	1178,3
6	1723,6	1181,8

Analisis dalam penelitian ini difokuskan pada evaluasi frekuensi pribadi khususnya untuk modus ke-5 dan ke-6 struktur mesin micro-milling. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada modus ke-5, struktur dengan penguat tegak lurus menunjukkan frekuensi pribadi yang lebih tinggi dibandingkan struktur dengan penguat diagonal, menandakan kekakuan struktur yang lebih baik dalam meredam getaran pada kondisi operasional tertentu. Sedangkan pada modus ke-6, perbedaan frekuensi pribadi antara kedua variasi menjadi lebih signifikan, menegaskan bahwa struktur dengan penguat

tegak lurus secara konsisten menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam menahan getaran. Hasil ini memperkuat rekomendasi penggunaan penguat tegak lurus pada struktur mesin micro-milling untuk mencapai stabilitas yang lebih tinggi dan presisi yang optimal selama proses pemesinan. Defleksi yang terjadi pada modus ke-5 dominan terhadap bagian kolom dimana melengkung terhadap sumbu Z (arah kanan-kiri). Hal ini menunjukkan kolom mengalami getaran dominan, sedangkan bed lebih kaku dan tidak bergerak. Sedangkan pada modus ke-6 mengalami bending terhadap sumbu X dan Y (lateral bending). Namun pada modus ini, simpangan kolom lebih dominan ke arah sumbu Y. Modus ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Modus Getar Variasi Tegak Lurus Fixed Support (a) Modus ke-5 (b) Modus ke-6

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa struktur mesin micro-milling berbahan steel-polymer concrete dengan variasi penguat tegak lurus menunjukkan kinerja dinamis yang lebih baik dibandingkan dengan variasi penguat diagonal. Hal ini ditunjukkan melalui simulasi metode elemen hingga (Finite Element Method) menggunakan perangkat lunak ANSYS, yang menghasilkan nilai frekuensi pribadi lebih tinggi pada modus ke-5 dan ke-6 untuk struktur dengan penguat tegak lurus. Frekuensi pribadi yang lebih tinggi ini mencerminkan kekakuan struktural yang lebih besar serta

kemampuan redaman getaran yang lebih baik. Selain itu, deformasi yang lebih rendah juga tercatat pada konfigurasi tegak lurus, menandakan kestabilan struktural yang lebih tinggi selama proses pemesinan. Hasil analisis *harmonic response* semakin menegaskan bahwa penguatan tegak lurus memiliki performa redaman yang lebih optimal, dengan rasio redaman yang lebih kecil pada frekuensi rendah. Oleh karena itu, penggunaan variasi penguatan tegak lurus direkomendasikan sebagai solusi penguatan struktur yang efektif untuk meningkatkan presisi, akurasi, dan kestabilan dinamika dalam aplikasi mesin micro-milling.

5. Daftar Pustaka

- [1] A. Brown, J. J. Rencis, D. Jensen, C.-C. Chen, E. Ibrahim, V. Labay, and P. Schimpf, “Finite element learning modules for undergraduate engineering topics using commercial software,” *American Society for Engineering Education*, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18260/1-2--3362>
- [2] P. Dunaj, B. Powałka, S. Berczyński, M. Chodźko, and T. Okulik, “Increasing lathe machining stability by using a composite steel–polymer concrete frame,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 31, pp. 1–13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.009>
- [3] Q. Li and Y. Gao, “Application of finite element method in textile process: a review,” *Journal of the Textile Institute*, vol. 115, no. 12, pp. 2444–2455, 2023. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2293321>
- [4] R. Li, “Research on application of finite element method in static analysis,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1802, no. 1, p. 042008, 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1802/4/042008>
- [5] V. Prantil and W. Howard, “Incorporating expectation failures in an undergraduate finite element course,” *ASEE Conference Proceedings*, pp. 13.730.1–13.730.14, 2020. <https://doi.org/10.18260/1-2--4492>
- [6] V. C. Prantil, C. Papadopoulos, and P. D. Gessler, “Lying by approximation: the truth about finite element analysis,” *Choice Reviews Online*, vol. 51, no. 09, pp. 51–5043, 2014. <https://doi.org/10.5860/choice.51-5043>
- [7] S. Sarjito, L. Brandon, I. Rasidi, and M. Zazuli, “Structure analysis of micro-milling machine construction frame design,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 205–212, 2021. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I1P231>
- [8] L. O’Toole, C.-W. Kang, and F.-Z. Fang, “Precision micro-milling process: state of the art,” *Advances in Manufacturing*, vol. 9, no. 2, pp. 173–205, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00323-0>
- [9] M. Valikhani, M. Nabiyan, M. Song, and V. Jahangiri, “Bayesian finite element model inversion of offshore wind turbine structures for joint parameter-load estimation,” *Ocean Engineering*, vol. 313, no. P3, p. 119458, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119458>
- [10] M. Venkata Ramana, P. R. Thyla, N. Mahendrakumar, and K. Praveena, “Selection of resin and aggregates for particulate polymer concrete machine tool structures – A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 8621–8628, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.595>