

PENGARUH VARIASI POLA PENGUATAN TERHADAP DINAMIKA STRUKTUR MESIN *MICRO-MILLING* KOMPOSIT

Marsya Aurellia Nandaputri Budiman¹, 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: marsyaurellia@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengeksplorasi perilaku dinamis struktur pada mesin *micro-milling* dengan menerapkan variasi pola penguatan (*reinforcement*) diagonal tanpa sudut menggunakan material komposit *steel-polymer concrete*. Metode elemen hingga digunakan untuk menganalisis dua bagian utama mesin, yaitu bed dan column, guna mengkaji dampak penggunaan material tersebut terhadap frekuensi alami, bentuk mode getar, dan rasio redaman. Proses simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Ansys, menggunakan *free-free condition*. Desain dan data model diperoleh dari Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Hasil analisis *free-free condition* menunjukkan nilai frekuensi alami yang lebih besar serta stabilitas modus getar yang lebih baik. Material *steel-polymer concrete* terbukti berkontribusi dalam meningkatkan kestabilan dan presisi mesin *micro-milling* melalui sifat redamannya yang tinggi dan bobot yang lebih ringan dibandingkan material *grey cast iron*.

Kata kunci: *free-free condition*; material komposit; metode elemen hingga; *micro-milling*; modus getar; *steel-polymer concrete*

Abstract

This study was conducted to explore the dynamic behavior of the structure of a micro-milling machine by applying various diagonal reinforcement patterns without corners, using steel-polymer concrete composite materials. The finite element method was used to analyze two main parts of the machine, namely the bed and column, to assess the impact of the use of these materials on the natural frequency, vibration mode shape, and damping ratio. The simulation process was carried out with the help of Ansys software, using free-free conditions. The design and model data were obtained from the National Research and Innovation Agency (BRIN). The results of the free-free condition analysis showed a higher natural frequency value and better vibration mode stability. Steel-polymer concrete material has been proven to contribute to improving the stability and precision of the micro-milling machine through its high damping properties and lighter weight compared to grey cast iron material.

Keywords: *composite material; finite element method; free-free condition; steel-polymer concrete; micro-milling machine; modes shape*

1. Pendahuluan

Micro-milling merupakan proses manufaktur presisi tinggi yang banyak digunakan di bidang biomedis, kedirgantaraan, dan elektronik karena kemampuannya menghasilkan komponen berskala mikro dengan toleransi ketat [1]. Struktur rangka mesin biasanya menggunakan *grey cast iron* karena kemampuan redamannya yang tinggi, namun bobotnya yang berat menjadi keterbatasan dalam aplikasi dinamis [2]. *Polymer concrete*, khususnya jika diperkuat dengan baja, menawarkan alternatif yang lebih ringan dengan karakteristik redaman dan stabilitas termal yang lebih baik [3][4]. Penelitian ini menganalisis pengaruh konfigurasi tulangan berbasis material *steel-polymer concrete* terhadap karakteristik dinamik mesin *micro-milling* menggunakan metode elemen hingga. Proses *micro-milling* merupakan salah satu teknik manufaktur presisi tinggi yang banyak digunakan dalam industri-industri berteknologi canggih seperti biomedis, kedirgantaraan, elektronik, dan optik. Dengan semakin meningkatnya kebutuhan terhadap komponen berskala mikro yang memiliki toleransi dimensi sangat ketat dan kualitas permukaan yang tinggi, proses pemesinan mikro seperti *micro-milling* menjadi solusi utama dalam menghasilkan produk dengan dimensi yang sangat kecil dan kompleks [1]. Dalam skala ini, keakuratan dimensi dan minimisasi getaran sangat penting untuk menjaga kestabilan proses pemesinan.

Rangka mesin *micro-milling* secara umum terbuat dari *grey cast iron* karena memiliki karakteristik redaman yang baik dan stabilitas dimensi yang tinggi. Namun, salah satu kelemahan utama dari material ini adalah bobotnya yang tinggi, yang berkontribusi terhadap keterbatasan dalam efisiensi dan fleksibilitas mesin [2]. Di sisi lain, perkembangan material komposit seperti *polymer concrete* menawarkan alternatif baru dalam desain struktur mesin. *Polymer concrete* memiliki

densitas yang lebih rendah dibandingkan *grey cast iron*, dengan sifat redaman internal yang cukup tinggi, menjadikannya kandidat ideal untuk aplikasi struktur presisi [3].

Meskipun *polymer concrete* memiliki kekuatan tekan yang lebih rendah dibandingkan logam konvensional, sifat ini dapat ditingkatkan dengan menambahkan tulangan baja pada bagian struktur kritis seperti kolom dan rangka dasar (bed) mesin. Kombinasi antara *polymer concrete* dan baja ini membentuk *steel-polymer concrete*, suatu material komposit struktural yang menggabungkan keunggulan redaman *polymer concrete* dengan kekuatan mekanis dari baja [4]. Beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan material ini dapat menurunkan amplitudo getaran dan meningkatkan kualitas permukaan hasil pemesinan [5][6]. Namun, tidak hanya jenis material yang berpengaruh terhadap performa dinamis mesin, tetapi juga konfigurasi geometris dari *reinforcement* (pengaku) yang digunakan. *Reinforcement* dalam arah tertentu seperti tegak lurus (linear) atau diagonal tanpa sudut (*oblique non-angular*) dapat memberikan perbedaan signifikan terhadap kekakuan dan karakteristik getar struktur mesin. Dengan demikian, optimalisasi konfigurasi *reinforcement* menjadi aspek penting dalam desain rangka mesin *micro-milling* [7]. Untuk itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis dinamik struktur mesin *micro-milling* dengan variasi *reinforcement* diagonal tanpa sudut, berbasis material komposit *steel-polymer concrete*, menggunakan pendekatan numerik melalui metode elemen hingga (*Finite Element Method*).

2. Metode Penelitian

Model geometri yang dianalisis terdiri dari dua komponen utama mesin *micro-milling*, yaitu *bed* dan kolom. Desain dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks, mengacu pada dimensi aktual yang diperoleh dari Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Struktur diperkuat dengan konfigurasi pola *reinforcement* diagonal tanpa sudut. Seluruh model menggunakan material *steel-polymer concrete*, yang merupakan material komposit hasil kombinasi *steel* dan polimer, dipilih karena memiliki karakteristik kekakuan tinggi dan kemampuan redaman yang baik.

Karakteristik material diambil dari literatur [5], di mana *polymer concrete* memiliki modulus Young 17,2 GPa dan densitas 2200 kg/m³, sedangkan baja memiliki modulus 210 GPa dan densitas 7812 kg/m³. Penggunaan konfigurasi pengaku diagonal merujuk pada hasil optimasi topologi berbasis metode pertumbuhan adaptif, yang terbukti mampu meningkatkan kekakuan internal struktur dalam penelitian sebelumnya [10].

3. Hasil dan Pembahasan

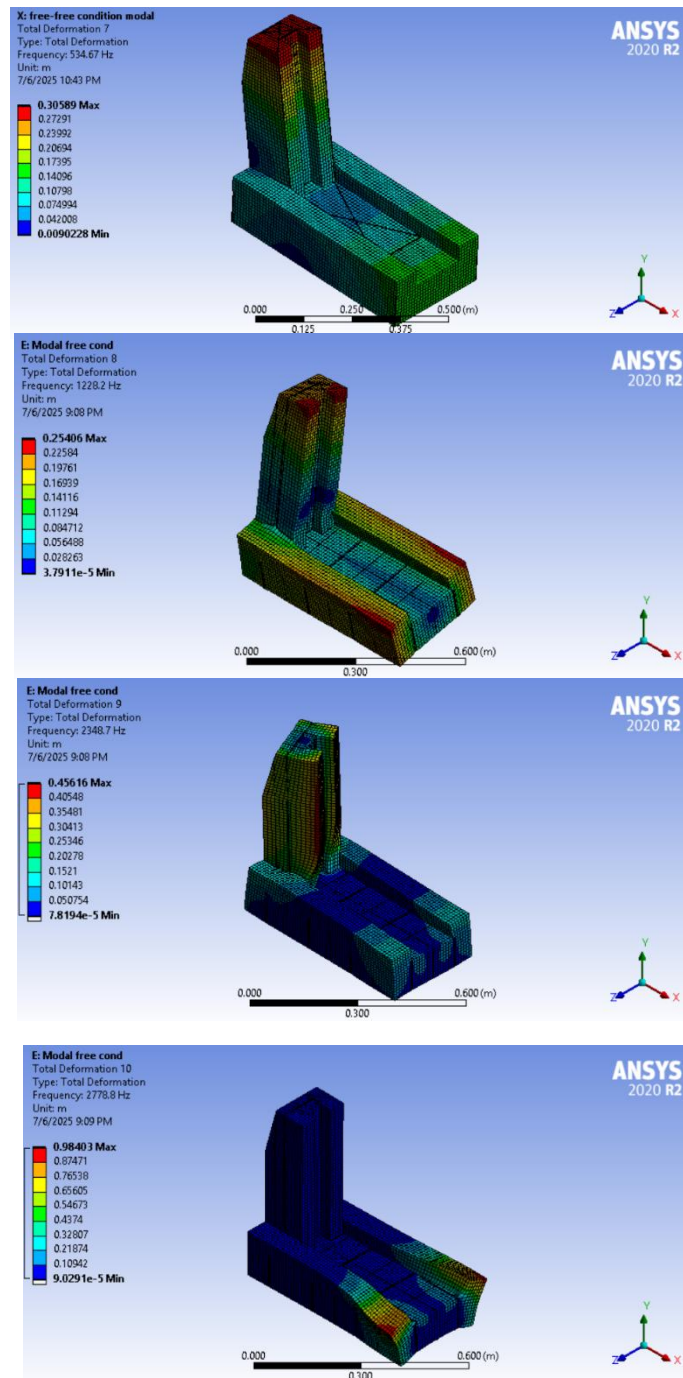
Hasil simulasi menunjukkan bahwa enam modus awal (modus getar 1–6) merupakan *rigid body motion* dengan nilai frekuensi mendekati nol. Oleh karena itu, pembahasan difokuskan pada modus ke-7 hingga ke-10. Nilai frekuensi pribadi masing-masing konfigurasi ditampilkan pada Tabel 4.6 sebagai berikut.

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

Modus	Frekuensi Pribadi (Hz)
7	534.67
8	1058.4
9	1931.8
10	2697.1

Hasil menunjukkan bahwa pada tiga dari empat modus (7, 8, dan 10), struktur tipe 2 memiliki frekuensi pribadi lebih tinggi, yang berarti struktur lebih kaku dan lebih tahan terhadap resonansi [2][4]. Hanya pada modus 9, tipe 1 sedikit lebih tinggi, namun perbedaannya tidak signifikan. Hal ini menegaskan bahwa konfigurasi pengaku diagonal mampu meningkatkan stabilitas dinamis struktur mesin [10].

Visualisasi modus getar ke-7 (Gambar 1) menunjukkan bahwa simpangan maksimum pada tipe 2 tersebar merata, tanpa konsentrasi deformasi pada satu titik. Ini mencerminkan distribusi kekakuan yang lebih baik dibanding tipe 1, yang cenderung mengalami simpangan lebih besar pada ujung kolom. Temuan ini sejalan dengan kajian Sarjito et al. (2021) yang menyatakan bahwa struktur dengan geometri pengaku optimal dapat mengurangi amplitudo getaran dan memperpanjang umur pakai komponen mesin [7].



Gambar 1. Hasil modus getar 7 hingga 10 simulasi *free-free condition*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode elemen hingga pada struktur mesin *micro-milling* berbahan *steel-polymer concrete*, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi pengaku memengaruhi karakteristik dinamis secara signifikan. Pada kondisi batas *free-free*, struktur dengan pengaku diagonal tanpa sudut menunjukkan nilai frekuensi pribadi yang lebih tinggi pada sebagian besar modus getar dibandingkan tipe pengaku konvensional, mengindikasikan kekakuan yang lebih baik dan ketahanan terhadap resonansi. Pola getar pada tipe ini juga menunjukkan distribusi simpangan yang lebih merata tanpa konsentrasi deformasi lokal, sehingga memberikan kestabilan struktural yang lebih unggul. Oleh karena itu, penggunaan konfigurasi pengaku diagonal direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi dan performa dinamis mesin *micro-milling* presisi tinggi.

5. Daftar Pustaka

- [1] O'Toole T., Yang J., Chen M. Precision Micro-Machining Applications and Developments. *Journal of Micro Engineering*, 2021; 12(2): 45–58.
- [2] Dunaj P., Berczyński S., Kowalczyk M. Dynamic Modelling of Machine Tool Structures Made of Polymer Concrete. *Applied Sciences*, 2020; 10(3): 1056.
- [3] Ramana M.V., Poojary D.R., Aithal R. Performance Evaluation of Polymer Concrete in Machine Tool Applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021; 46(11): 7654–7659.
- [4] Ahmad N., Jagadeesha T. Dynamic Response of Micro-Milling Machine Bed Using Polymer Concrete. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 2021; 1055: 012023.
- [5] Niesterowicz M., Śliwa R.E., Buczkowski R. Mechanical and Damping Properties of Polymer Concrete. *Procedia Engineering*, 2020; 182: 309–316.
- [6] Yang X., Li Z., Wu C. Modal Analysis Techniques in Machine Tool Design and Optimization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017; 98: 33–45.
- [7] Sarjito A., Kurniawan D., Surojo E. Dynamic Simulation of Frame Structure for Micro-Machining Applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021; 35(5): 2021–2030.
- [8] Kelly S.G. *Mechanical Vibrations: Theory and Applications*. 4th ed. Cengage Learning; 2022.
- [9] Kwon Y., Lee K., Park J. Experimental Study on Damping Properties of Polymer Composite Materials. *Composite Structures*, 2019; 225: 111218.
- [10] Shen W., Gao X., Li Q. Adaptive Growth Method for Topology Optimization of Continuum Structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019; 60: 1079–1093.