

ABSTRAK

Optimasi parameter proses dan kombinasi material pada pencetakan 3D multimaterial–multinozel merupakan permasalahan kompleks karena melibatkan banyak parameter yang saling berinteraksi serta beberapa fungsi objektif yang bersifat saling berkonflik. Pada praktiknya, peningkatan sifat mekanik sering kali berimplikasi pada meningkatnya waktu pencetakan, konsumsi energi, atau penurunan akurasi dimensi. Sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada pendekatan *single-objective*, berbasis simulasi, atau belum mengintegrasikan validasi eksperimental secara memadai, khususnya pada sistem *Independent Dual Extruder* (IDEX). Penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka optimasi multiobjektif yang komprehensif untuk menentukan kombinasi parameter proses dan komposisi material optimal pada sistem 3D *printing* multimaterial–multinozel jenis IDEX. Pendekatan hybrid *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) digunakan, dengan *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) sebagai metode pembandingan (*benchmark*). ANN dikembangkan sebagai *surrogate* model untuk memprediksi enam fungsi objektif, yaitu *tensile strength*, *compressive strength*, *flexural strength*, *deposition rate*, *specific energy consumption*, dan *mean dimensional accuracy deviation*, berdasarkan delapan variabel keputusan proses dan material. Model prediksi ini kemudian diintegrasikan ke dalam algoritma optimasi multiobjektif untuk menghasilkan solusi *Pareto* yang merepresentasikan berbagai kompromi kinerja.

Hasil optimasi menunjukkan bahwa tidak terdapat satu kombinasi parameter dan material yang unggul untuk seluruh fungsi objektif secara simultan, sehingga pendekatan multiobjektif menjadi krusial. Secara umum, solusi optimal memperlihatkan kecenderungan *layer thickness* pada rentang menengah–rendah, *infill density* tinggi ($\approx 90\text{--}100\%$), *print speed* moderat, serta *raster width* menengah untuk menjaga stabilitas mekanik. Dari sisi material, konfigurasi APA (ABS–PLA–ABS) dan HPH unggul untuk pencapaian performa mekanik maksimum, sementara PAP dan PHP lebih optimal untuk efisiensi energi dan stabilitas akurasi dimensi. Validasi eksperimental terhadap solusi terpilih menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil prediksi dan hasil cetak aktual. Kebaruan utama penelitian ini terletak pada integrasi ANN sebagai model prediksi dengan optimasi multiobjektif enam fungsi tujuan menggunakan MOPSO dan NSGA-II pada sistem 3D *printing* multimaterial–multinozel jenis IDEX, yang dilengkapi dengan validasi eksperimental. Pendekatan ini tidak hanya menghasilkan rekomendasi parameter proses optimal secara global, tetapi juga menyediakan dasar seleksi parameter dan material berbasis preferensi multiobjektif untuk aplikasi manufaktur aditif yang berbeda.

Kata Kunci: *Multi-material 3D Printing, Fused Deposition Modelling (FDM), Artificial Neural Network (ANN), Multi-objective optimization (MOPSO, NSGA-II), Metode Hybrid*

ABSTRACT

Optimizing process parameters and material combinations in multi-material, multi-nozzle 3D printing is a complex problem because it involves many interacting parameters and several conflicting objective functions. In practice, improving mechanical properties often results in increased printing time, energy consumption, or reduced dimensional accuracy. Most previous studies have focused on single-objective approaches, simulation-based approaches, or have not adequately integrated experimental validation, particularly in Independent Dual Extruder (IDEX) systems. This study aims to develop a comprehensive multi-objective optimization framework to determine the optimal combination of process parameters and material composition in IDEX-type multimaterial–multinozzle 3D printing systems. A hybrid approach of Artificial Neural Network (ANN) and Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) is used, with Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) as the benchmark method. ANN was developed as a surrogate model to predict six objective functions, namely tensile strength, compressive strength, flexural strength, deposition rate, specific energy consumption, and mean dimensional accuracy deviation, based on eight process and material decision variables. This prediction model was then integrated into a multi-objective optimization algorithm to generate Pareto solutions that represent various performance compromises.

The optimization results show that there is no single combination of parameters and materials that excels in all objective functions simultaneously, making a multi-objective approach crucial. In general, the optimal solution shows a tendency toward medium-to-low layer thickness, high infill density ($\approx 90\text{--}100\%$), moderate print speed, and medium raster width to maintain mechanical stability. In terms of materials, the APA (ABS–PLA–ABS) and HPH configurations are superior for achieving maximum mechanical performance, while PAP and PHP are more optimal for energy efficiency and dimensional accuracy stability. Experimental validation of the selected solutions shows good agreement between the predicted results and the actual print results. The main novelty of this research lies in the integration of ANN as a prediction model with six-objective multiobjective optimization using MOPSO and NSGA-II in an IDEX-type multimaterial–multinozzle 3D printing system, equipped with experimental validation. This approach not only produces globally optimal process parameter recommendations but also provides a basis for multi-objective preference-based parameter and material selection for different additive manufacturing applications.

Keywords: Multi-material 3D Printing, Fused Deposition Modelling (FDM), Artificial Neural Network (ANN), Multi-objective optimization (MOPSO, NSGA-II), Metode Hybrid