

INTRISARI

Akumulasi eksponensial limbah fotovoltaik (PV) saat ini menuntut adanya strategi daur ulang berkelanjutan yang melampaui metode pembuangan konvensional melalui pendekatan sirkular yang inovatif. Penelitian ini memelopori pengembangan material komposit *Digital Light Processing* (DLP) berbasis limbah PV berbahaya yang terintegrasi dengan teknologi Deep Learning, guna menjembatani kesenjangan antara valorisasi material sisa dan karakterisasi material cerdas. Dengan memanfaatkan serbuk kaca hasil pemrosesan ulang limbah PV sebagai filler, studi ini mengeksplorasi potensi mekanis dan fisik dari resin fotosensitif yang diperkuat, sekaligus menawarkan solusi preventif terhadap dampak lingkungan dari limbah elektronik yang kian meningkat.

Karakterisasi eksperimental mengungkap adanya kompromi kritis antara densitas fisik dan kematangan curing yang sangat dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel. Meskipun penggunaan partikel halus (fraksi -600 *mesh*) menghasilkan densitas pengemasan yang superior, ukuran ini memicu hamburan cahaya yang menghambat proses fotopolimerisasi secara menyeluruh. Sebaliknya, partikel yang lebih kasar (fraksi -200/+400 *mesh*) terbukti memfasilitasi transmisi sinar UV yang lebih optimal, sehingga menghasilkan performa mekanik puncak dengan kekuatan tarik mencapai 27,77 MPa, kekuatan lentur 33,75 MPa, dan kekerasan permukaan 65,00 Shore D. Temuan ini dikoroborasi oleh analisis mikrostruktur melalui *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang mengidentifikasi mekanisme kegagalan seperti *micro-voids* dan *fiber pull-out*, serta tervalidasi secara presisi melalui simulasi *Finite Element Method* (FEM) dan pengukuran regangan optik berbasis *Digital Image Correlation* (DIC).

Guna mengatasi kendala biaya dan waktu pada pengujian destruktif yang masif, penelitian ini mengintegrasikan arsitektur *Long Short-Term Memory* (LSTM) untuk memprediksi perilaku tegangan-regangan non-linear material secara komputasi. Analisis data menunjukkan bahwa penggunaan dataset spesifik dengan algoritma optimasi Adamax menghasilkan tingkat akurasi prediksi tertinggi dibandingkan metode konvensional lainnya. Arsitektur model yang teroptimasi (konfigurasi 1F, 3B, dan 2C) terbukti mampu menghasilkan prediksi yang sangat presisi dengan koefisien determinasi (R^2) melampaui 0,9. Dengan menggabungkan aspek keberlanjutan material dan teknologi Industri 4.0, penelitian ini menghadirkan perangkat prediksi presisi tinggi yang mendukung aplikasi digital twin dalam rekayasa manufaktur aditif yang cerdas dan berkelanjutan.

Kata kunci: Limbah fotovoltaik, *Glass powder*, Komposit, *Deep Learning*, *Long Short-Term Memory*.

ABSTRACT

The exponential accumulation of photovoltaic (PV) waste necessitates sustainable recycling strategies that transcend conventional disposal methods through innovative circular approaches. This research pioneers the development of hazardous PV waste-based Digital Light Processing (DLP) composite materials integrated with Deep Learning, bridging the gap between material valorization and intelligent characterization. By repurposing glass powder from PV waste as a functional filler, this study explores the mechanical and physical potential of reinforced photosensitive resins, offering a proactive solution to the environmental impact of increasing electronic waste.

Experimental characterization reveals a critical trade-off between physical density and curing maturity, significantly influenced by particle size distribution. Although the use of fine particles (-600 mesh) yields superior packing density, this fraction triggers light scattering that inhibits comprehensive photopolymerization. Conversely, coarser particles (-200/+400 mesh) facilitate more optimal UV light transmission, resulting in peak mechanical performance with a tensile strength of 27.77 MPa, flexural strength of 33.75 MPa, and surface hardness of 65.00 Shore D. These findings are corroborated by Scanning Electron Microscopy (SEM) microstructure analysis, which identifies failure mechanisms such as micro-voids and fiber pull-out, and are further validated through Finite Element Method (FEM) simulations and Digital Image Correlation (DIC) optical strain measurements.

To overcome the cost and time constraints of extensive destructive testing, this study integrates Long Short-Term Memory (LSTM) architectures to computationally predict the non-linear stress-strain behavior of the material. Data analysis confirms that utilizing specific datasets with the Adamax optimization algorithm yields the highest predictive accuracy. The optimized model architecture (1F, 3B, and 2C configurations) demonstrates highly precise predictions with a coefficient of determination (R^2) exceeding 0.9. By merging material sustainability with Industry 4.0 technologies, this research presents a high-precision predictive tool supporting digital twin applications in intelligent and sustainable additive manufacturing.

Keywords: Photovoltaic waste, Glass powder, Composite, Deep Learning, Long Short-Term Memory.