UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pengaruh Konfigurasi Conductive TPU pada Self-Sensing 3D Printed Braided Bending Actuator dengan
Sistem Teleoperasi Master-Slave**
Ahmad Aziz Adyatma Salman, Ardi Wiranata S.T., M.Eng., Ph.D., IPP
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Pengendalian aktuator lunak (*soft actuator*) yang akurat menuntut informasi mengenai keadaan deformasinya, namun penambahan sensor eksternal menambah kekakuan dan kerumitan sistem yang bertentangan dengan prinsip dasar robot lunak. Konsep penginderaan mandiri (*self-sensing*) menjadi solusi atas permasalahan ini, dan material *conductive thermoplastic polyurethane* (C-TPU) yang dicetak langsung menggunakan *fused deposition modeling* (FDM) berpotensi mewujudkan aktuator dan sensor dalam satu struktur cetak tanpa perakitan tambahan. Penelitian ini bertujuan merancang dan memfabrikasi *self-sensing braided bending actuator* dengan lapisan sensor C-TPU terintegrasi, mengkaji pengaruh konfigurasi lapisan C-TPU terhadap respons *self-sensing*, karakteristik aktuasi, dan kinerja sistem teleoperasi *master-slave*, serta mengimplementasikan konfigurasi terbaik pada sistem teleoperasi empat jari. Tiga taraf fraksi volume C-TPU dikaji, yaitu 30,95%, 18,15%, dan 9,73%, dicetak secara monolitik menggunakan *printer FDM dual-extruder* tanpa *support*. Pengujian karakterisasi dan teleoperasi menunjukkan bahwa berkurangnya fraksi volume C-TPU meningkatkan kelenturan aktuator sehingga sudut tekuk maksimum meningkat dari 7,85° menjadi 10,34°, sensitivitas penginderaan meningkat dari 25,35 menjadi 47,38 %/(kg/cm²), dan rentang perubahan resistansi ($\Delta R/R_0$) meningkat dari 10,58% menjadi 19,29%. Kecenderungan yang sama terbawa pada kinerja teleoperasi, dengan fraksi volume terkecil memberikan koefisien korelasi penjejakan tertinggi sebesar 0,967, waktu tunda terkecil sebesar 0,76 ± 0,14 detik, dan galat penjejakan ternormalisasi terkecil sebesar 14,7%. Berdasarkan hasil tersebut, konfigurasi dengan fraksi volume C-TPU 9,73% ditetapkan sebagai konfigurasi terbaik, dengan kebutuhan material C-TPU 68,6% lebih rendah dibandingkan konfigurasi dengan fraksi volume terbesar. Konfigurasi ini berhasil diimplementasikan pada sistem teleoperasi *master-slave* empat jari yang mampu membaca keempat kanal penginderaan dengan jelas dan membedakan perintah gerak antar jari, meskipun purwarupa belum mampu melakukan gerakan menggenggam akibat keterbatasan tekanan kerja pada 1,25 kg/cm².

Kata kunci: *self-sensing*, *conductive TPU*, *braided bending actuator*, *soft robotics*, teleoperasi *master-slave*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pengaruh Konfigurasi Conductive TPU pada Self-Sensing 3D Printed Braided Bending Actuator dengan
Sistem Teleoperasi Master-Slave**
Ahmad Aziz Adyatma Salman, Ardi Wiranata S.T., M.Eng., Ph.D., IPP
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Accurate control of soft actuators requires information about their deformation state, yet adding external sensors increases stiffness and complexity, contradicting the core principle of soft robotics. Self-sensing addresses this issue, and conductive thermoplastic polyurethane (C-TPU) printed directly via fused deposition modeling (FDM) offers the potential to integrate actuation and sensing within a single printed structure without additional assembly. This study aims to design and fabricate a self-sensing braided bending actuator with an integrated C-TPU sensing layer, to examine the effect of C-TPU layer configuration on self-sensing response, actuation characteristics, and master-slave teleoperation performance, and to implement the best-performing configuration in a four-finger teleoperation system. Three C-TPU volume fraction levels were investigated, namely 30,95%, 18,15%, and 9,73%, monolithically printed using a dual-extruder FDM printer without support material. Characterization and teleoperation testing showed that decreasing the C-TPU volume fraction increased actuator flexibility, raising the maximum bending angle from 7,85° to 10,34°, sensing sensitivity from 25,35 to 47,38 %/(kg/cm²), and the relative resistance change ($\Delta R/R_0$) from 10,58% to 19,29%. A similar trend was observed in teleoperation performance, with the smallest volume fraction yielding the highest tracking correlation coefficient of 0.967, the shortest time delay of 0,76 ± 0,14 seconds, and the smallest normalized tracking error of 14,7%. Based on these results, the configuration with a 9,73% C-TPU volume fraction was selected as the best configuration, requiring 68,6% less C-TPU material than the configuration with the largest volume fraction. This configuration was successfully implemented in a four-finger master-slave teleoperation system that clearly read all four sensing channels and distinguished motion commands between fingers, although the prototype was not yet able to perform a grasping motion due to the working pressure being limited to 1,25 kg/cm².

Keywords: self-sensing, conductive TPU, braided bending actuator, soft robotics, master-slave teleoperation