

ABSTRAK

Eksoskeleton tungkai bawah aktif menawarkan potensi sebagai alat bantu mobilitas, namun implementasi sistem kontrol yang efektif, terutama pada mekanisme *cable-driven* yang non-linear, masih menjadi tantangan. Penelitian ini bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) pada prototipe eksoskeleton tungkai bawah *cable-driven low-cost* sebagai *proof of concept* untuk asistensi fase ayun saat berjalan datar. Sistem terdiri dari sensor IMU MPU6050 dengan Kalman Filter pada *sender* (ESP32) dan kontroler PID pada *receiver* (ESP32) yang menggerakkan motor DC melalui *driver* BTS7960. *Tuning* PID dilakukan menggunakan metode *Ziegler-Nichols* sebagai acuan awal ($K_u \approx 20.0$. dan $T_u \approx 1.28$ detik. menghasilkan $K_p=12.0$, $K_i=18.81$, $K_d=1.91$), diikuti *fine-tuning* yang menghasilkan gain final $K_p=12.0$, $K_i=1.88$, $K_d=1.91$ yang mengurangi *overshoot* menjadi $\sim 6.09\%$. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan pola sudut paha *baseline* (tanpa eksoskeleton) dengan saat menggunakan eksoskeleton (dengan PID final) selama berjalan datar dan menaiki tangga menggunakan analisis kualitatif serta kuantitatif (RMSE, Korelasi Pearson, DTW). Hasil menunjukkan korelasi Pearson yang sangat kuat ($r > 0.95$) antara *baseline* dan eksoskeleton pada kedua aktivitas, mengindikasikan kemampuan mengikuti pola dasar gerakan. Namun, RMSE yang moderat ($\sim 6.2-6.3$ derajat) dan analisis DTW (jarak 15.8 untuk berjalan, 9.2 untuk tangga) serta observasi kualitatif mengungkap adanya deviasi signifikan, termasuk limitasi ekstensi saat berjalan dan *overshoot* target. Disimpulkan bahwa prototipe berfungsi sebagai bukti konsep, namun arsitektur kontroler PID awal memiliki keterbatasan signifikan yang menghambat performa optimal dan kealamian gerakan, sehingga memerlukan *refactoring* perangkat lunak dan eksplorasi algoritma kontrol lanjutan.

Kata Kunci: eksoskeleton *lower-limb*, kontrol PID, *cable-driven*, *tuning Ziegler-Nichols*, analisis gait, RMSE, korelasi Pearson, DTW.